

**Dimensionamento e Otimização de um Sistema
de Bombeamento Fotovoltaico para Irrigação:
Ilha de Santiago, Santa Cruz.**

Josianny Patrícia Sanches Furtado

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
para obtenção do grau de Mestre em
Energia Renovável e Eficiência Energética

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

Ana Isabel Pereira

Luis Frólén Ribeiro

Novembro 2020

Agradecimentos

“Não escolha o caminho mais fácil, pois é na dificuldade que se revela o melhor.”

Chego ao fim de mais uma fase da minha vida, realizada com muito esforço e dedicação.

Agradeço primeiramente aos meus pais, pelo incentivo incondicional e pela confiança deposita em mim.

A todos os meus professores, pelo conhecimento transmitido ao longo desses anos, que acredito ter ajudado de alguma forma na realização deste projeto.

A minha irmã e aos meus amigos, agradeço pela confiança, motivação e incentivo durante todo esse período.

Por fim, agradeço imensamente os meus orientadores, professora Ana Isabel Perreia e o professor Luís Manuel Ribeiro pela paciência e dedicação. E em especial agradeço também o professor José Batista.

Filipenses 4:13 “Tudo posso naquele que me fortalece”

Resumo

O bombeamento solar de água é baseado em energia fotovoltaica, tecnologia que converte a energia solar em energia elétrica para acionar uma bomba de água acoplada a um motor DC ou AC. A tecnologia é reconhecida como uma solução sustentável e ecológica para fornecer água para a agricultura, uso doméstico ou animal.

Apresenta-se neste trabalho, o dimensionamento, o orçamento e a otimização de três Sistemas Autônomos de Bombeamento Fotovoltaico para três furos de captações de águas subterrâneas, projetados para a zona agrícola de Santa Cruz, Cabo Verde. Os sistemas dimensionados têm como objetivo irrigar um campo agrícola de 2 ha, com plantações de banana, cebola, feijão e milho. O dimensionamento fotovoltaico foi realizado tendo em conta as necessidades hídricas diárias das plantações, $94,75 \text{ m}^3/\text{dia}$ de volume de água. Para assegurar a satisfação energética no pior cenário de radiação solar e garantir a satisfação das necessidades, o dimensionamento foi realizado para o mês em que a relação procura/oferta de energia, correspondente à situação em que é necessário maior número de módulos fotovoltaicos. A natureza do sistema dimensionado, torna necessário o armazenamento da água bombeada, visto que o sistema só funcionará de dia, quando há radiação solar. As características dos aquíferos, implicam furos com diferentes características, como o caudal e a profundidade. Assim como o tipo de revestimento, como os furos *open hole*, furos sem revestimento e furos com revestimento, o que resulta em diferentes orçamentos. A otimização recorrendo ao Algoritmo Genético visa encontrar a melhor solução de acordo com a configuração dos sistemas, tendo em conta o sistema de bombeamento fotovoltaico, as características e os tipos de revestimento dos furos e o número de reservatórios para o armazenamento da água. Os resultados levaram a concluir que dois furos com 100 m de profundidade, com $50 \text{ m}^3/\text{s}$ de volume e revestimento *open hole* cada um, ligados a um reservatório, é a melhor solução capaz de satisfazer as necessidades hídricas do campo agrícola, com um orçamento de 24 706,36 €.

Palavras chaves: Sistema de bombeamento fotovoltaico, dimensionamento, otimização, algoritmo genético.

Abstract

The solar-powered water pumping system is based on photovoltaic energy, a technology that converts solar energy into electricity to trigger a water pump coupled to a DC or AC motor. The technology is known as a sustainable and ecological solution to provide water for agriculture, household, or animal use.

This study addresses the dimensioning, the budget, and the optimization of three autonomous systems of photovoltaic pumping to three groundwater abstraction boreholes, designed for the agricultural zone of Santa Cruz, Cape Verde. The purpose of the dimensioned systems is to irrigate an agricultural field of 2 ha with banana, onion, bean and corn plantations. The photovoltaic dimensioning was made regarding the daily water requirements for plantations, $94,75 m^3$ of water. To ensure the energy satisfaction in the worst solar radiation scenario and assure the satisfaction of the needs, the dimensioning was carried out for the month that the ratio supply/demand of energy related to the situation in which more photovoltaic modules are necessary. The nature of the dimensioned system makes the pumped water storage necessary, since the system only works during the day, when it has solar radiation. The aquifers features involve boreholes with different characteristics, such as flow rate and depth. As well as the type of coating, as the boreholes *open hole*, the boreholes without coating and the boreholes with coating, that results in different budgets. The optimization with *Genetic Algorithm* aims to find the best solution according to the systems configuration, regarding the photovoltaic pumping system, the borehole coating characteristics and types and the number of reservoirs for water storage. The results have led to the conclusion that two boreholes with 100 m depth, $50 m^3/s$ flow rate and *open hole* coating each one, connected to a reservoir is the best solution able to satisfy the water requirements in the agricultural field, with 24 706,36 € of budget.

Keywords: photovoltaic pumping system, dimensioning, optimization, genetic algorithm.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	vi
Abstract.....	viii
Índice	x
Lista de símbolos, siglas e acrónimos	xiv
Lista de Tabelas	xv
Lista de Figuras	xviii
Capítulo 1	1
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do problema.....	1
1.2. Descrição do problema	3
1.3. Motivação	4
1.4. Objetivo	4
1.5. Estrutura	5
Capítulo 2	7
2. Estado da Arte e Fundamentos teóricos	7
2.1. Sistema de Bombeamento Fotovoltaico	7
2.1.1. Estado Atual da Tecnologia.....	8
2.1.2. Processo de Dimensionamento.....	9
2.1.3. Desempenho de Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico- Revisão.....	12
2.1.4. Otimização de Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico	19
2.1.5. Desafios e Soluções	21
2.1.5.1. Capital.....	22
2.1.5.2. Problema de Operação e Manutenção (O&M)	22
2.1.5.3. Viabilidade Económica.....	23

2.2.	Projeto de um Sistema de Bombeamento Fotovoltaico de água	24
2.2.1.	Painel Fotovoltaico.....	24
2.2.2.	Motor.....	25
2.2.2.1.	Motor de Corrente Contínua (DC).....	25
2.2.2.2.	Motor de Corrente Alternada (AC).....	26
2.2.3.	Bomba	26
2.2.3.1.	Bomba Centrífuga.....	27
2.2.3.2.	Bomba volumétrica.....	28
2.2.4.	Dispositivos de Eletrônica de Potência	29
2.2.4.1.	Conversor DC-DC	29
2.2.4.2.	Inversor DC-AC.....	29
2.2.4.3.	Conversor de frequência AC-AC.....	30
Capítulo 3	31
3.	Materiais e Métodos	31
3.1.	Dimensionamento Fotovoltaico.....	31
3.1.1	Necessidade de água.....	31
3.1.2.	Cálculo da Energia Hidráulica Necessária	34
3.1.3.	Cálculo da Energia Fotovoltaica Necessária	40
3.1.4.	Cálculo do Número de Módulos Fotovoltaicos Necessários.....	43
3.1.5.	Dimensionamento do inversor DC-AC, conversor de frequência AC-AC, cabos elétricos de ligação e dispositivos de segurança.....	46
3.1.5.1.	Inversor DC-AC.....	46
3.1.5.1.1.	Cálculo de número de módulos por fileira.....	46
3.1.5.1.1.1.	Cálculo da Tensão dos Módulos para Diferentes Condições de Funcionamento (10 e 70°C)	47
3.1.5.1.	Conversor de Frequência	49
3.1.5.2.	Dispositivos de segurança.....	51

3.1.5.2.1.	Interruptor DC.....	51
3.1.5.2.2.	Disjuntor AC.....	52
3.1.5.3.	Cabos elétricos.....	53
3.1.5.4.	Cabos DC.....	53
3.1.5.5.	Cabos AC.....	54
3.1.6.	Diagrama Unifilar.....	57
3.2.	Dimensionamento do Furo de captação.....	59
3.2.1.	Dimensionamento do furo.....	62
3.2.1.1.	Furo <i>Open Hole</i>	63
3.2.1.2.	Furo Sem Revestimento de Maciço Filtrante.....	68
3.2.1.3.	Furo com Revestimento de Maciço Filtrante.....	72
3.3.	Configuração do Sistema.....	76
3.4.	Caracterização dos Equipamentos.....	80
3.4.1.	Painel Fotovoltaico.....	80
3.4.2.	Conjunto Motobomba.....	80
3.4.3.	Inversor DC-AC.....	83
3.4.4.	Conversor de Frequência AC-AC.....	83
3.4.5.	Interruptor DC.....	84
3.4.6.	Disjuntor AC.....	85
3.4.7.	Cabos DC.....	85
3.4.8.	Cabos AC.....	86
Capítulo 4	87
4.	Resultados e Discussões.....	87
4.2.	Orçamento das Configurações.....	87
4.3.	Otimização do Sistema.....	92
4.4.	Impactos.....	96

4.4.1. Impacto Social	96
4.4.2. Impacto Económico	97
Capítulo 5	98
5. Conclusões e Trabalhos Futuros	98
5.1. Conclusões	98
5.2. Trabalhos Futuros	100
Referências Bibliográficas	101
Apêndice	109
Apêndice A: Ficheiro MatLab (Função Func)	109
Apêndice A: Ficheiro MatLab (Função AG)	111
Anexos	112
Anexo I- Painel Fotovoltaico SK6612P 330W	112
Anexo II- Inversor Sunny Tripower	113
Anexo III- Conjunto Motobomba 9-21	114
Anexo IV- Conjunto Motobomba 7-27	115
Anexo V- Conjunto Motobomba 5A-33	116

Lista de símbolos, siglas e acrónimos

A	Ampere
AC	<i>Alternate Current</i> (corrente alternada)
BFV	Bombeamento Fotovoltaico
CF	Conversor de Frequência
DC	<i>Direct Current</i> (corrente contínua)
GA	<i>Genetic Algorithm</i> (algoritmo genético)
MPP	<i>Maximum Power Point</i> (ponto de potência máxima)
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (rastreamento no ponto de potência máxima)
SFV	Sistema Fotovoltaico
PFV	Painel Fotovoltaico
SBFV	Sistema de Bombeamento Fotovoltaico
STC	<i>Standard Test Conditions</i> (condições de teste padrão)
PWM	Pulse Width Modulation (modulação por largura de pulso)
V	Volts
F	Frequência
W	<i>Watts</i>

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Necessidade de água por hectare para as diferentes plantações. Fonte: [34].	32
Tabela 2 - Área ocupada pela plantação e a sua necessidade de água.....	32
Tabela 3 - Distribuição do volume de água necessário, por hora, dia, mês e ano em m3.	33
Tabela 4 - Caracterização dos furos de acordo com o volume e a profundidade.	33
Tabela 5 - Características dos furos.....	34
Tabela 6 - Perdas de carga nas tubulações em PVC. Fonte: [34].	35
Tabela 7 - Perdas de carga nas conexões em PVC. Fonte: [34].	36
Tabela 8 - Diâmetro da tubagem PVC para os furos.....	36
Tabela 9 - O número de conexões necessário nas tubagens e as respetivas perdas.	37
Tabela 10 - Velocidade, Número de Reynolds e coeficiente de atrito do circuito hidráulico do furo 1, 2 e 3.....	37
Tabela 11 - Perdas ocorridas no circuito hidráulico e a altura total de bombagem dos furos.....	38
Tabela 12 - Energia hidráulica requerida no furo 1, 2 e 3.	38
Tabela 13 - Seção das tubagens e as respetivas perdas do furo 1, 2 e 3.....	39
Tabela 14 - Perdas ocorridas na tubagem, nas conexões e a altura manométrica corrigida do furo 1, 2 e 3.....	40
Tabela 15 - Energia hidráulica do furo 1, 2 e 3 obtido pelo segundo método de cálculo aplicado.....	40
Tabela 16 - Características do conjunto motobomba escolhido para o furo 1, 2 e 3.....	41
Tabela 17 - Radiação solar mensal em Cabo Verde. Fonte: [46].	41
Tabela 18 - Valores de eficiência para configurações de SBFV com diferentes tipos de bombas. Fonte: [34].....	42

Tabela 19 - Características técnicas do módulo o Akcome 330 kW.....	44
Tabela 20- Número de módulos necessário no furo 1, 2 e 3.	45
Tabela 21 - Dados técnicos dos conjuntos motobombas do furo 1, 2 e 3.	46
Tabela 22- Dados Técnicos do inversor <i>Sunny Tripower</i>	47
Tabela 23 - Dados técnicos do conversor de frequência ACS355-03E-24A4-2 para o ligação elétrica do furo 1 e 2.	50
Tabela 24 - Dados técnicos do conversor de frequência ACS355-03E-17A6-2 para o ligação elétrica do furo 3.	51
Tabela 25 - Características dos cabos DC escolhidos para os circuitos elétricos dos furos 1, 2 e 3. Fonte: [50].	56
Tabela 26- Características dos cabos AC escolhidos para o circuito elétrico do furo 1, 2 e 3. Fonte: [51] [52].	57
Tabela 27 - Orçamento total do furo 1 <i>open hole</i>	65
Tabela 28 - Orçamento total do furo 2 <i>open hole</i>	66
Tabela 29 - Orçamento total do furo 3 <i>open hole</i>	67
Tabela 30 - Orçamento total do furo 1 Sem revestimento.....	69
Tabela 31 - Orçamento total do furo 2 Sem revestimento.....	70
Tabela 32-Orçamento total do furo 3 Sem revestimento.....	71
Tabela 33 - Orçamento total do furo 1 Com Revestimento.....	73
Tabela 34 - Orçamento total do furo 2 Com Revestimento.....	74
Tabela 35-Orçamento total do furo 3 Com Revestimento.....	75
Tabela 36 - Dados técnicos do Conjunto motobomba SP 9_21 do Furo 1.....	81
Tabela 37 - Dados técnicos do Conjunto motobomba SP 7-27 do Furo 2.	82
Tabela 38 - Dados técnicos do Conjunto motobomba SP 5A-33 do Furo 3.	83

Tabela 39 - Orçamento de cada um dos furos para cada tipo de revestimento ligado a um reservatório.	88
Tabela 40 - Orçamento de cada um dos furos para cada tipo de revestimento ligado a dois reservatórios.	89
Tabela 41 - Orçamento total dos furos 2 e 3 para cada tipo de revestimento ligado a um único reservatório e ligados a um reservatório cada furo.	90
Tabela 42 - Orçamento total dos furos para cada tipo de revestimento com um reservatório.	90
Tabela 43- Orçamento total dos furos para cada tipo de revestimento ligado a dois reservatórios.	91
Tabela 44 - Orçamento total dos furos para cada tipo de revestimento com furo 1 ligado a um reservatório e furo 2 e 3 ligado a outro reservatório.	91
Tabela 45 - Orçamento total dos furos para cada tipo de revestimento ligados a um único reservatório.	92
Tabela 46 - Soluções encontradas através do AG e as suas características.	96

Lista de Figuras

Figura 1-Localização geográfica de Cabo Verde. Fonte: [2].	1
Figura 2-As ilhas de Cabo Verde. Fonte: [4].	2
Figura 3- Diagrama simplificado do circuito do CF. Fonte: [42].....	30
Figura 4- Esquema de um furo de captação de água subterrânea ligado a um reservatório. Fonte: [34]	39
Figura 5- Esquema de ligação dos cabos de ligação das strings e o cabo DC principal. Fonte: [47]. Adaptado.....	53
Figura 6-Cabo blindado trifásico, três condutores fase e um terra para alimentação do motor AC. Fonte: [42].	55
Figura 7 - Diagrama unifilar dos furos 1, 2 e 3.	58
Figura 8-Componentes de um furo de captação de água subterrânea. Fonte: [53].	60
Figura 9-Componentes de um furo de captação <i>open hole</i> . Fonte: [53].....	61
Figura 10-Componentes de um furo com revestimento total de maciço filtrante. Fonte: [53].	62
Figura 11- Módulo fotovoltaico Akcome 330 W. Fonte: [54].	80
Figura 12-Conjunto motobomba Grundfos. Fonte: [55]	81
Figura 13- Inversor <i>Sunny Tripower 5.0</i>	83
Figura 14 - Conversor de frequência da ABB ACS355-03E. Fonte: [56].....	84
Figura 15- Interruptor Tangou 2P 32 A. Fonte: [57].....	84
Figura 16-Disjuntor 3P AC 6/10KA 3M. Fonte: [49].	85
Figura 17- Cabo principal DC, para polo positivo e negativo do circuito elétrico dos furos. Fonte: [58] [59].....	86
Figura 18- Cabos BELDEN com 4 condutores para alimentação do motor no furo 1, 2 e 3.Fonte: [51].	86

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Enquadramento do problema

O arquipélago de Cabo Verde localiza-se na Costa Ocidental da África $14^{\circ} 23'$ e $17^{\circ} 12'$ latitude norte e os meridianos $22^{\circ} 40'$ e $25^{\circ} 22'$ a oeste de Greenwich [1], ver Figura 1 localização geográfica de Cabo Verde. É constituído pelas ilhas de: Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia, São Nicolau, Sal, Boa Vista, Maio, Santiago, Fogo e Brava, representados na Figura 2.



Figura 1 - Localização geográfica de Cabo Verde. Fonte: [2].

Geograficamente o arquipélago de Cabo Verde fica localizado numa vasta região de clima árido e semiárido do continente africano que corresponde a uma zona de transição entre o deserto do Sahara e as savanas do Sudão, denominados de Sahel. Deste modo o clima de Cabo Verde é classificado de tropical seco, caracterizado pela existência de duas estações distintas durante o ano, a estação seca de aproximadamente 9 meses, dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril, maio e junho, intercalada com uma estação húmida de 3 meses: agosto, setembro e outubro, designadas de estação das águas. Julho e novembro são considerados meses de transição [3].



Figura 2 - As ilhas de Cabo Verde. Fonte: [4].

Os registos históricos mostram que, além dos períodos de seca registados, a precipitação média têm variado pouco ao longo do último século [5]. As secas periódicas de longo prazo são características históricas do clima de Cabo Verde [6], condicionado por três circulações atmosféricas de origem e características distintas:

- Ventos Harmatão: são ventos provenientes do deserto do Sahara que atinge as ilhas ainda quentes e secos, apesar do percurso marítimo de centenas de quilómetros, normalmente transportando uma grande quantidade de poeiras e aumentando a aridez do clima, com prejuízo na prática da agricultura;
- Ventos Alísios de Nordeste: são ventos dominantes que ocorrem durante quase todo o ano, dando origem a períodos de precipitação, beneficiando sobretudo as zonas de maior altitude, mesmo durante a estação seca;
- Monção do Atlântico Sul: é uma corrente de ar quente e húmida, com origem na região equatorial, normalmente atingem o arquipélago durante o verão. Quando entra em contacto com os ventos Alísios e com o vento Harmatão formam a convergência intertropical (CIT). Quando a CIT atinge a latitude do arquipélago, a ilha recebe os aguaceiros da sua estação húmida. As pequenas mudanças na posição da convergência tem um efeito no clima, causando alterações críticas na precipitação anual do país [6].

Tanto a irregularidade quanto a quantidade de chuva em locais específicos nas ilhas dependem fortemente da altitude. As precipitações anuais no arquipélago são na generalidade fracas. Os valores médios não ultrapassam os 300 mm para as zonas situadas abaixo de 400 m de altitude, e 700 mm para as zonas situadas a mais de 500 m

de altitude e expostas aos ventos alísios [5]. Assim, o clima do Arquipélago de Cabo Verde apresenta algumas semelhanças aos climas desérticos quentes. Porém, possui diferenças notórias por ter maior humidade do ar e precipitações periódicas, com os ventos Alísios desempenhando um papel fundamental na modelação do clima do país.

1.2. Descrição do problema

As flutuações que ocorrem na precipitação anual do país, são particularmente desastrosas para os cabo-verdianos, impondo muitas restrições no desenvolvimento da atividade agrícola. O seu papel no equilíbrio socioeconómico é definido em dois grandes domínios: a agricultura como fornecedora de matérias primas ou alimentares e a agricultura como fonte de empregos ou como sustentáculo parcial de empregos em outros sectores [3]. O cenário atual da agricultura cabo-verdiana apresenta-se muito frágil por depender das condições pluviométricas. A população do meio rural é a mais afetada pelo regime pluviométrico irregular do país, onde cerca de 196 mil habitantes aproximadamente cerca de 37% da população Cabo Verdiana, são afetados direta ou indiretamente [7]. Para fazer face à fraca pluviosidade, é comum a exploração de fontes de água de origem natural como: nascentes, charcos, lagoas, além da criação de infraestruturas hidráulicas: barragens, poços e sistemas de bombeamento de águas subterrâneas, com o objetivo de minimizar a escassez de água para irrigação [8].

Segundo o Plano Nacional de Saneamento Básico de 2010, o volume global de água subterrânea explorado em Cabo Verde é estimado em cerca de $99\,409\text{ m}^3/\text{dia}$, estimando-se que só na ilha Santiago se atinge um total de $53\,989\text{ m}^3/\text{dia}$, contribuindo as nascentes com cerca de 44% deste valor, os poços com 28,9% e os furos com 28% [5]. Os furos de captação de água em funcionamento são alimentadas por motores a diesel. Entretanto vários estudos já comprovaram que a viabilidade económica dos sistemas de bombeamento fotovoltaico, são melhores do que os sistemas de bombeamento a diesel para diferentes capacidades [9]. A aplicação de sistemas fotovoltaicos em furos de captação de águas subterrâneas¹ é uma aplicação económica em locais remotos [10].

¹ Águas subterrâneas - é toda a água que ocorre abaixo da superfície da Terra dividido à precipitação.

1.3. Motivação

O sector agrícola apesar das restrições que limitam o seu desenvolvimento, assegura a subsistência e a geração de emprego das famílias da comunidade local e contribui parcialmente para a segurança alimentar e nutricional da população do país. Assim, surge a necessidade e a preocupação de garantir o bem estar e uma vida estável para a comunidade Cabo-verdiana.

O estudo de uma solução mais económica, capaz de fazer face às problemáticas provocadas pela condição climática do país, poderá dar uma contribuição significativa no campo teórico e prático em projetos de bombeamento fotovoltaico por meio de furos de captação de água subterrânea em Cabo Verde.

Para compreender as vulnerabilidades e as potencialidades desse sector é de vital importância que o governo possa formular e pôr em prática um conjunto de instrumentos de política, para transformar a realidade socioeconómica do meio rural, mudando o cenário problemático.

1.4. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo encontrar a melhor solução economicamente viável no contexto de sistema de bombeamento fotovoltaico capaz de satisfazer as necessidades diárias de água de um campo de plantação agrícola. Propõe-se projetar, dimensionar e otimizar o sistema de acordo com as necessidades do local, para esse efeito foi necessário os seguintes objetivos secundários:

- Estimativa da área de plantação, delimitação da dimensão e os tipos de plantações presentes na área, permitindo determinar o volume de água diário necessário;
- Estimativa de número de furos para captação de água no local e respetivas características como a profundidade e o volume de água a ser extraído para garantir que todos os furos sejam capazes de satisfazer as necessidades do campo;

- Dimensionamento do sistema de bombeamento fotovoltaico para cada um dos furos estimados no local de acordo com as suas características;
- Dimensionamento dos furos consoante as características do aquífero;
- Configuração do sistema de ligação entre os furos com o reservatório de armazenamento, para diferentes cenários de capacidade de armazenamento e número de furos ligados ao reservatório;
- Seleção dos equipamentos de acordo com os resultados obtidos no dimensionamento e garantindo sempre a escolha mais económica;
- Otimização em número de furos, tipo de revestimento, sistema de bombagem fotovoltaica e configuração do sistema através do Algoritmo genético.

1.5. Estrutura

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, organizados de seguinte modo:

- Introdução, tem por finalidade fazer o enquadramento do problema e a motivação que determinou a escolha da dissertação, bem como os objetivos do trabalho e uma breve descrição sobre a estrutura da mesma.
- Estado da arte e Fundamentos teóricos, apresenta o estado atual da tecnologia fotovoltaica de bombeamento; o seu processo de dimensionamento; os estudos realizados sobre o desempenho do sistema baseado em diferentes configurações; os desafios enfrentados e as soluções encontradas e método utilizado para a otimização desses sistemas. Em seguida a descrição de cada componente do sistema e o efeito da configuração fotovoltaica no sistema.
- Materiais e Métodos, apresenta o dimensionamento do sistema de bombeamento fotovoltaico, de acordo com a necessidade de consumo de água diário das

plantações e a energia hidráulica requerida pelo sistema; o cálculo do número de módulos, o dimensionamento do conversor de frequência, dos condutores elétricos e dos dispositivos de proteção. Assim como o dimensionamento dos furos de captação, a configuração de ligação dos furos.

- Resultados e Discussões, apresenta a caracterização dos equipamentos escolhidos, o orçamento obtido das configurações definidas e a otimização do sistema para encontrar a solução ótima do projeto. Bem como a discussão das soluções encontradas e os impactos económicos e sociais do sistema na comunidade
- Conclusões e Trabalhos Futuros, foi reservado para as conclusões obtidas com o desenvolvimento do projeto, bem como algumas recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

2. Estado da Arte e Fundamentos teóricos

Este capítulo apresenta o estado atual assim como os fundamentos teóricos relevantes para uma melhor compreensão da tecnologia aplicada no projeto. Na primeira parte é apresentada o estado atual da tecnologia fotovoltaica para bombagem, seguindo-se da descrição dos cálculos necessários para o dimensionamento do sistema, o desempenho do sistema de acordo com a seleção dos diferentes equipamentos e o método utilizado para otimização dos sistemas de bombeamento fotovoltaicos. Numa segunda parte é apresentada uma descrição de cada componente que integra um sistema de bombeamento fotovoltaico, painel fotovoltaico, conjunto motobomba, dispositivos de controlo e o efeito da configuração fotovoltaica no sistema.

2.1. Sistema de Bombeamento Fotovoltaico

A água é a principal fonte de vida para a humanidade e uma das necessidades mais básicas para o desenvolvimento rural. A sua falta, faz com que seja necessário transportar a água das fontes para os locais de consumo. O uso de bombas de água estão em uso há séculos para bombear água. A maior parte das bombas disponíveis comercialmente funcionam com motores elétricos ou combustão interna (gasolina ou diesel). Convencionalmente, a eletricidade é fornecida por redes nacionais de abastecimento a partir da queima de combustíveis fósseis [11]. O fornecimento de eletricidade por parte das redes nacionais torna-se um nas áreas remotas que não podem ser conectadas diretamente as redes de abastecimento. A tecnologia de Bombeamento Fotovoltaico (BFV) de água é considerada uma solução sustentável e económica capaz de fazer substituir os sistemas convencionais [12].

Um Sistema de Bombeamento Fotovoltaico (SBFV) deve ser projetada de acordo com a estrutura socioeconómica da área específica, tendo como principal objetivo: melhorar a qualidade de vida das pessoas, criar postos de trabalho na localidade, promover empregos, empregar recursos e materiais locais, ser compatível com a cultura e as práticas locais e maximizar o uso de energias renováveis [13].

2.1.1. Estado Atual da Tecnologia

Um sistema de bombeamento de água fotovoltaico, é composta por uma fonte de alimentação, o painel fotovoltaico (PFV), um conjunto motobomba que pode ser Direct Current (DC) e Alternative Current (AC) podendo ser de superfície ou submersível ligados a dispositivos eletrônicos para o controle do sistema.

A matriz fotovoltaica pode, ou não, ser configurada com sistemas de seguimento solar, designados de seguidores solares que são utilizados para potencializar ainda mais a produção energética da matriz fotovoltaica. Geralmente os SBFV não utilizam baterias, por isso, é necessário o uso de reservatórios para armazenar a água bombeada durante o dia. Para uso noturno ou para dias com menor radiação solar. Todos os equipamentos mencionados devem estar em conformidade com as especificações nacionais/internacionais, aplicáveis no país.

O SBFV ligado a um conjunto motobomba DC, designado de acoplamento direto foi utilizado pela primeira vez no final dos anos 1970. Desde então, avanços e melhorias têm sido feitos para melhorar o desempenho e a confiabilidade destes sistemas. Apesar do acoplamento direto ser uma configuração simples e confiável, o sistema não funciona no ponto de potência máxima (MPP) do gerador fotovoltaico, devido a variação solar durante todo o dia, por isso, em alguns sistemas é instalado um seguidor de MPP para melhorar o desempenho da bomba fotovoltaica. Os SBFV são classificados como sistema de bombeamento fotovoltaico de primeira geração quando o motor DC, ou AC, aciona uma bomba centrífuga e de segunda geração quando aciona uma bomba de deslocamento positivo, bomba de cavidade progressiva ou bomba de diafragma. Os SBFV de primeira geração apresentam uma variação na eficiência hidráulica de 25-35%, já os de segunda geração apresentam uma eficiência superior de 70%, são também caracterizados por necessitarem de menos energia fotovoltaica e possuir um baixo custo.

A tecnologia atual utilizada nos SBFV utilizam controladores. Este sistema eletrônico fornece valores de entrada do sistema que monitoriza os níveis do reservatório, controla a velocidade da bomba e usa a tecnologia de seguimento MPPT- *Máximo Power Point Tracking*, contribuindo para que o desempenho e a eficiência geral do sistema seja melhorada. Os SBFV mostraram avanços significativos na última década. Os avanços ocorreram no mecanismo de seguimento dos PFVs de seguimento manual para sistemas

de seguimento automático de eixo duplo por programação de microcontroladores. A vantagem da utilização do seguidor solar, é a diminuição do área do PVF necessário para a bombagem, a melhora da eficiência geral do sistema, aumentando cerca de 25-50% a produção total do sistema de bombagem e conseqüentemente o retorno sobre o investimento [14] [15]. Os sistemas podem ser configurados com diferentes tipos de bombas, as bombas de motor helicoidal submersíveis (bombas de deslocamento positivo) foram as que apresentaram as melhorias mais significativas nos últimos quinze anos [14].

2.1.2. Processo de Dimensionamento

A metodologia usada para dimensionamento de sistemas de bombeamento fotovoltaico de água começa pela estimativa da necessidade de água necessária na zona do projeto. A principal maneira de avaliar essa necessidade é seguindo os registos históricos, realizar entrevistas com os habitantes locais ou as autoridades responsáveis pelo abastecimento de água local.

A necessidade de água ou, o Caudal (Q) em m^3 determinará a energia hidráulica E_h expressa em kWh/dia requerida para fornecer o Q de água através da Equação (2.1), onde ρ é a densidade da água ($998,2 kg/m^3$), g é a aceleração da gravidade ($9,81 m/s^2$) e H é a altura que o fluido será bombado em m [16].

$$E_h = \rho * g * Q * H \quad (2.1)$$

H é dada pela Equação (2.2) e resulta da soma da descarga estática (H_e), ou seja, a distância vertical entre o nível do solo e o nível da água, mais a altura dinâmica (H_d), o nível de rebaixamento durante o bombeamento da água e as perdas (H_f) que ocorrem em todo o circuito (Equação 2.3).

$$H = H_e + H_d + H_f \quad (2.2)$$

$$H_f = \Delta H_1 + \Delta H_2 \quad (2.3)$$

As perdas no circuito expressa pela Equação (2.4), ocorrem devido a viscosidade do fluido (ΔH_1) em todo o comprimento da tubagem (L) devido ao atrito (λ) afetado pelo

diâmetro (D) e as perdas localizadas, que ocorrem nas conexões, como cotovelos, junções e válvulas (ΔH_2). Esses componentes afetam a velocidade (U) (Equação (2.5)) do fluido de acordo com o coeficiente (K) relacionado ao componente da conexão (Equação (2.6)). O valor do número de Reynolds (R_e) expressa pela Equação (2.7), onde μ e a rugosidade relativa do tubo (R_r) em m afetam o coeficiente de atrito, expressa pela Equação (2.8), quando o $R_e \leq 2000$ ou pela Equação (2.9) quando $2000 < R_e < 10^5$. Quando aplicada a Equação (2.9) é necessária uma interação numérica para encontrar o valor do coeficiente de atrito [16].

$$\Delta H_1 = \frac{1}{2 \cdot g} * \lambda * \frac{L}{D} * U^2 \quad (2.4)$$

$$\Delta H_2 = \frac{1}{2 \cdot g} * K * U^2 \quad (2.5)$$

$$U = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad (2.6)$$

Para $R_e \leq 2000$, λ :

$$R_e = \frac{\rho \cdot Q \cdot D}{\mu} \quad (2.7)$$

$$\lambda = \frac{64}{R_e} \quad (2.8)$$

Para $2000 < R_e < 10^5$, λ :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{R_r}{3.7} + \frac{2.51}{R_e \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \quad (2.9)$$

A energia diária da matriz fotovoltaica (E_{FV}) necessária para a bombagem do volume de água, é obtida através do valor da potência hidráulica necessária, com a irradiação média solar diária (I_T em kWh/m^2 dia) que incide no plano da matriz no local, o fator de incompatibilidade da matriz (F) e a eficiência diária do conjunto motobomba (η_{cm}) como mostra a Equação (2.10).

$$E_{FV} = \frac{P_h}{(I_T * F * \eta_{cm})} \quad (2.10)$$

A potência de saída de um módulo fotovoltaico em situações de campo, é universalmente mais baixa do que as observadas em Standard Test Conditions (STC), mesmo quando as condições de funcionamento são semelhantes. Essa situação é chamada de perda de incompatibilidade. Essas perdas podem ocorrer devido a: tolerância do fabricante nas características da célula, uma vez que diferentes tamanhos ou materiais de processamento podem ser adquiridos pelas células durante o seu processo de fabricação, o que resulta numa potência de saída menor do que a soma da potência máxima de saída das células. Essa perda aumenta com o passar dos anos devido ao fator de envelhecimento das células; estresse ambientais como o impacto do granizo nos módulos causando a abertura parcial ou total de uma coluna devido à quebra da mesma; o último fator é o sombreamento, as matrizes celulares são sujeitas a diferentes fontes de sombreamento, podendo ser previsíveis ou não. Independentemente da fonte o sombreamento origina uma diminuição na saída da potência nominal, para as células ligadas em série a corrente em toda a conexão é bloqueada criando pontos quentes nas células sombreadas podendo danificar o encapsulamento ou partir a célula, causando falha do módulo. A ligação da matriz em série reduz os efeitos de incompatibilidades elétricas [17].

A eficiência do conjunto motobomba em percentagem (%) é dada pela Equação (2.11).

$$\eta_{cm} = \frac{E_h \text{ saída}}{E \text{ de entrada}} \quad (2.11)$$

A eficiência da matriz fotovoltaica (η_{fv}) é obtida em Wp através da irradiação solar (Wh/m^2) na matriz e na área A (m^2) ocupada pela mesma, através da Equação (2.12).

$$\eta_{fv} = \frac{E_{FV}}{I_T * A} \quad (2.12)$$

Conhecendo o rendimento do conjunto motobomba (η_{cm}) e a eficiência da matriz fotovoltaica (η_{fv}), é possível calcular a eficiência total do sistema aplicando a Equação (2.13).

$$\eta_T = \eta_{cm} * \eta_{fv} \quad (2.13)$$

O volume de água bombeada em m^3 pelo sistema é dada através da Equação (2.14), conhecendo a energia fotovoltaica da matriz (P_{FV}), a irradiação média solar diária (I_T), o fator de incompatibilidade da matriz (F), o rendimento do conjunto motobomba (η_{cm}), a densidade (ρ), a gravidade (g), e a altura de bombagem (H) [14].

$$V_b = \frac{E_{FV} * I_T * F * \eta_{cm}}{\rho * g * H} \quad (2.14)$$

2.1.3. Desempenho de Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico- Revisão

Em termos cronológicos encontrou-se referências dos estudos de Argaw [18] que apresentou uma técnica simples de otimização não linear para resolver o problema de correspondência de carga de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água. A correspondência adequada do subsistema (motor/bomba) com um painel fotovoltaico é essencial para a utilização máxima dos sistemas de bombeamento de água. Os principais problemas de tais sistemas estão relacionados principalmente com a característica não linear da irradiância solar e à tensão dependente da temperatura da célula e às características da corrente do gerador fotovoltaico. Argaw tenta resolver o problema de dimensionamento de uma bomba centrífuga acoplada a um motor de indução assíncrono alimentado por um PFV através de inversor DC-AC. A eficiência de um inversor varia com a potência de saída do gerador fotovoltaico. Em dias de pouca radiação solar, a eficiência do sistema fotovoltaico pode ser muito baixa para inversores convencionais. Por isso, o controle de velocidade de motores AC, usando o método de modulação por largura de pulso PWM, é desenvolvida para otimizar o sistema, minimizando os harmônicos de tensão para minimizar as perdas no motor, reduzir a pulsação do binário e minimizar o ruído acústico. O sistema consiste em 4 fileiras (em paralelo (P)) com 8 módulos ligados em série (S) 8S x 4P com 1,76 kWp de potência, um motor/bomba do tipo M40/SP5A-7 e um inversor DC-AC SA1 500. O estudo conclui que a utilidade do painel fotovoltaico depende principalmente do perfil de radiação solar, da potência de saída do painel e das características da carga. Um fator de correspondência ideal de máximo 0,74 e mínimo 0,55, respectivamente na melhor e pior situação do mês, pode ser alcançado pelo sistema usando o inversor DC-AC [18].

C. Adnene e J. Moncef [19], desenvolveram um método de controle e dimensionamento de SBFV autônomas. O método baseia-se no modelo dinâmico PFV-DC/DC-Inversor-Motor Assíncrono. O conversor DC-DC garante uma adaptação da impedância entre o PFV e a carga e uma extração de energia de saída ideal do painel PFV. O conversor DC-AC garante um controle de modulação por largura de pulso PWM do motor de indução e um sinal de saída senoidal. Esta metodologia permite um ótimo controle e monitoramento de conversores contínuo-contínuo e contínuo-alternativo, calculando respectivamente a relação cíclica DC-DC e a frequência DC-AC. Um dos objetivos do estudo é garantir a potência máxima de saída do PFV, saída essa que pode ser alcançada controlando o conversor DC-DC no modo MPPT garantir a eficiência ideal, obtido através do controle da frequência do conversor DC-AC. Ao contrário dos métodos clássicos, este método se baseia no modelo paramétrico do SBFV, permite um melhor aproveitamento da instalação fotovoltaica, mesmo em situações de variações na condição climática e na carga. Os autores concluíram que as variações climáticas (temperatura e irradiação) não afetam o desempenho e o comportamento do motor se utilizado um controle MPPT para o conversor DC-AC e um controle PWM do conversor. [19].

Badescu [20], estudou o desempenho com a variação do tempo de um SBF. Composto por um arranjo fotovoltaico, um motor, uma bomba centrífuga, uma bateria e um tanque de água. Os resultados, como esperado, mostram que o tempo de variação da potência do módulo é dependente da variação da irradiância solar incidido no mesmo, o fornecimento de energia é menor em dias com céu nublado, a energia armazenada e extraída da bateria é a mesma fornecida pelo módulo fotovoltaico. Observou também, que a potência mecânica armazenada no tanque de água é bastante constante durante o dia, não se observou nenhuma dependência óbvia num determinado mês ou estação. A fração da energia fornecida pela bateria que é armazenada na energia gravitacional da água é quase constante durante o dia, mês e ano. Esses resultados fizeram Badescu concluir que o tanque de armazenamento e a bateria aumentam a estabilidade operacional dos SBFV [20].

Pande et al. [21] projetou, desenvolveu e testou o desempenho de um SBFV de irrigação por gotejamento para pomares de romã em crescimento na região árida da Índia. Pande considerou diferentes parâmetros no projeto, como o tamanho das bombas, a necessidade de água, variação diurna na pressão da bomba devido à mudança na irradiância e

compensação de pressão nos gotejadores. O sistema composto por uma matriz fotovoltaica de 900 W e uma bomba acoplada a um motor DC de 800 W, forneceu água com um caudal de 3,4 a 3,8 l/h numa faixa de pressão de 70-100 kPa, irrigando cerca de 1 ha de área em 2 h, o desempenho do sistema mostrou ser capaz de irrigar mais de 5 ha. O período de reembolso observado para o sistema foi de 6 anos [21].

Cuadros et al [22] descreveu o procedimento de dimensionamento de um sistema de bombeamento solar conectado a um inversor ligado a uma bomba AC, para irrigação por gotejamento de um pomar de oliveiras na Espanha. O método consiste em três etapas principais: 1- determinar as necessidades de irrigação da propriedade específica de acordo com as características de seu tipo de solo e clima; 2- uma análise hidráulica do sistema de bombeamento de acordo com a profundidade do aquífero e a altura necessária para estabilizar a pressão na rede de distribuição de água; 3- determinação do pico de energia fotovoltaica necessária para irrigar uma área de 10 ha. Um sistema de bombeamento PV de 6 kWp foi suficiente para fornecer os requisitos de irrigação da área de 10 ha, fornecendo um caudal de $161 m^3$ por dia. O objetivo final do projeto é a criação de riqueza em regiões economicamente deprimidas, evitar o uso de combustíveis fósseis, proporcionar oportunidades de trabalho e desenvolvimento sustentável para a população rural [22].

Em um estudo económico, Odeh et. al [9], compara a viabilidade económica de sistemas fotovoltaicos e a diesel de bombeamento de água, num faixa de potência de 2,1 – 15 kW_p com base nos dados de desempenho real e na experiência operacional de três anos na Jordânia. Entre os cinco sistemas de bombeamento fotovoltaico, três são sistemas instalados e dois são sistemas fictícios que utilizam dados reais obtidos dos outros três sistemas, utilizam bombas centrífugas, motores de indução e inversores DC/AC. A potência instalada é de 2,8 kW_p, 4,5 kW_p, 6,3 kW_p, 10 kW_p e 15 kW_p. São considerados cinco sistemas de bombeamento a diesel, com potências comparáveis aos sistemas de bombeamento fotovoltaico, 3,5 kVA, 4,5 kVA, 6,3 kVA, 10 kVA, 15 kVA, o preço do diesel considerado para o caso base é de 0,2\$/litro, preço real prevalecente no mercado jordano no ano de 2004. Os parâmetros de entrada utilizados no estudo foram: a energia hidráulica equivalente em m^4 , expressa o volume de saída de água (m^3) por altura manométrica total (m), nível de insolação, vida útil dos componentes do sistema

fotovoltaico e do sistema de bombeamento a diesel, valor residual, a taxa de juros, e preço do óleo combustível. Odeh verificou que os SBFV são mais económicos que os sistemas de bombeamento a diesel para uma energia hidráulica equivalente abaixo de $2\ 100\ 000\ m^4/ano$. Para aplicações maiores, os sistemas de bombeamento a diesel se tornam mais económicos. Os custos médios de energia hidráulica equivalente dos cinco sistemas aumentam de $3,1\$/1000\ m^4$ para SBFV e $6,13\$/1000\ m^4$ para sistema de bombeamento a diesel, com taxa de juros de 0% e de $7,12\$/1000\ m^4$ para SBFV e $6,65\$/1000\ m^4$ com taxa de juros de 20%. Isso equivale a um aumento de 130% no custo unitário da energia hidráulica equivalente do sistema de bombeamento FV e apenas 8,5% no caso do diesel. A altura de bombeamento tem grande efeito no custo unitário do volume de água ($\$/m^3$). Considerando um poço raso de 20 m de altura total de bombeamento, em vez de um poço de 100 m de altura de bombeamento, o custo unitário do volume de água reduz em cerca de 5 vezes, ou seja, $0,42\ \$/m^3$ para $0,084\ \$/m^3$. A incompatibilidade entre o consumo e o padrão de fornecimento também afeta a viabilidade económica do sistema, os estudos levaram a concluir que todos os sistemas foram sobredimensionados por um fator de 1,69–2,9, tendo como exemplo o sistema fotovoltaico com $4\ 500\ W_p$, o custo unitário da energia hidráulica equivalente aumenta de $4,2\$/1000\ m^4$ para $7,4\$/1000\ m^4$, houve um aumento de 76%. Devido ao alto custo de capital, as aplicações de bombeamento fotovoltaico de água eram limitadas no passado para aplicações de pequena escala. Mas atualmente, o uso de sistemas de até $11\ W_p$ não só está se tornando viável, mas também pode ser introduzido como projetos de investimento rentável [9].

Hamidat e Benyoucef [23] desenvolveram dois modelos vinculados diretamente a energia elétrica operacional à taxa de fluxo da água da bomba em relação à altura manométrica total. O desempenho dos dois modelos de tecnologias diferentes, é calculado com base nos dados meteorológicos medidos de diferentes locais localizados no Saara e nas regiões costeiras da Argélia. Argel e Oran localizados no Norte, com clima mediterrâneo e localizados no Sul, Bechar com clima do Saara e Tamanrasset com clima do Saara e com chuvas no verão. O primeiro modelo possui uma bomba centrífuga submersível, acoplada a um motor AC trifásico, por meio de um inversor trifásico DC-AC. No segundo modelo a bomba é de deslocamento positivo (bomba volumétrica) acoplado a um motor acionado por um controlador eletrónico DC-DC. Três configurações de PFVs foram utilizadas para

calcular o desempenho elétrico e hidráulico para comparar os desempenhos dos subsistemas de bombeamento dos dois modelos. A configuração dos módulos FV foram as seguintes: 250 W_p com cinco módulos em série 5S \times 1P; 300 W_p com seis módulos em série 6S \times 1P; 350 W_p com sete módulos em série 7S \times 1P. O subsistema configurado pelo segundo modelo, apresentou uma eficiência média de bombeamento de 40% e uma eficiência total média de 5% para as três configurações de painéis fotovoltaicos. Por outro lado, a eficiência média de bombeamento e a eficiência média total do subsistema com bomba centrífuga não excedeu, 14% e 1,8% respectivamente, para as três configurações de painéis fotovoltaicos. Observou-se também que a condição climática das diferentes localizações influenciaram no desempenho dos sistemas. As perdas médias de energia para as duas cidades do sul, são menores que 10% para a bomba de deslocamento positivo e menor que 15% para a bomba centrífuga. Para Argel e Oran localizados no Norte, as perdas são maiores que 90% para a bomba centrífuga e maior que 45% para a bomba de deslocamento positivo. O volume médio de água bombeado pela bomba de deslocamento positivo para Tamanrasset e Bechar é três vezes superior em comparação com o volume médio de água bombeado para Argel e Oran. Hamidat e Benyoucef concluíram que: o bombeamento médio e as eficiências totais para a bomba de deslocamento positivo são definitivamente mais elevados, para uma grande faixa de carga total, em comparação com a bomba centrífuga; para um determinado local, o volume médio de água bombeado por bombas de deslocamento positivo é muito maior em comparação com as bombas centrífugas; a elevada radiação solar diária dos locais do sul permite ter melhores desempenhos de bombagem relativamente à média diária de água bombeada e às perdas médias diárias de energia em comparação com os locais do norte [23].

Hamrouni et al [24], em um estudo semelhante ao realizado por Badescu, estudou a influência da variação da radiação solar no desempenho de um sistema de bombeamento fotovoltaico autônomo instalados na Tunísia. Composto por gerador fotovoltaico (230 V/2100 W_p), um conversor DC-DC de potência, um inversor DC-AC ligado a um motor assíncrono que aciona uma bomba centrífuga submersível com 1,5 kW de potência e um reservatório de água. O conversor DC-DC, que é usado para processar continuamente as características de saída do PFV para a entrada da bomba, foi inserido entre o gerador fotovoltaico e a bomba. O inversor DC-AC fornece um sistema trifásico de tensões que variam em amplitude e frequência de acordo com a radiação solar. Assim como Badescu,

Hamrouni relatou que a potência do gerador fotovoltaico, como seria de esperar, aumenta com o aumento da radiação solar. Portanto, o caudal da bomba aumenta em consequência desse aumento. A quantidade média de água gerada por dia é igual a $7,7 \text{ m}^3/\text{dia}$ no inverno e $14,7 \text{ m}^3/\text{dia}$ no verão e a eficiência global oscila entre 3% e 4%. Concluiu-se que estes desempenhos são máximos ao meio-dia, mas degradam-se quando ocorrem mudanças nos parâmetros meteorológicos [24].

Mokeddem et al [25] fez um estudo experimental realizado para investigar o desempenho de um sistema de bombeamento de água fotovoltaico acoplado diretamente (SBFV-DC). O sistema é composto por um painel fotovoltaico de 1,5 kWp, um motor DC e uma bomba centrífuga. O desempenho do sistema foi monitorado sob diferentes condições climáticas e irradiância solar da Argélia durante um período de quatro meses, utilizando componentes locais projetados para o bombeamento fotovoltaico. O sistema é um projeto de baixo custo, sem nenhum controle eletrônico complexo e sistemas auxiliares (baterias). O sistema bombeia água por mais de 8 h, das 09:00 até 17:30 h, porém, a eficiência da motobomba não ultrapassou 30%, sendo este o valor típico de um sistema de bombeamento fotovoltaico diretamente acoplado. Ainda assim, o sistema é adequado para irrigação e manutenção de abastecimento doméstico de água e animal em zonas remotas. O sistema funciona com baixa manutenção devido à ausência de bateria e controle eletrônico e a sua eficiência pode ser aumentada selecionando cuidadosamente o tamanho da matriz fotovoltaica, sua orientação e o conjunto motobomba [25].

A fim de melhorar o desempenho de um SBFV alimentado por um motor de indução, A. Tayebi, M. Brahami, M. Yaichi e B. Abdelkader [26] projetaram e implementaram um inversor de modulação de vetor espacial (SVM) destinado ao sistema. A SVM foi originalmente desenvolvida como uma abordagem vetorial de PWM para inversores trifásicos, o mesmo possibilita transformar diretamente os vetores de tensão do estator (sistemas de coordenadas), para sinais de modulação por PWM (valores do ciclo de trabalho). A maximização da potência do gerador é garantida por meio de um inversor de frequência variável na técnica V/f e sem integração de um conversor DC/DC. Uma vez que a potência de entrada exigida pelo motor depende da carga, tensão de excitação e frequência, a relação V/f é mantida constante para que o motor forneça um torque constante. O método de controle V/f é simples, o que simplifica a implementação da técnica SVM e permite que a placa inerte acione o sistema com estrutura simples, fácil

controle, tamanho reduzido, alta eficiência e menor custo. A relação fixa V/f é inserida na equação, o programa do algoritmo SVM é implementado em uma plataforma de microcontrolador microchip PIC18F4550 para controlar o motor de indução acionado por um inversor, para obter a razão V/f constante. Para o controle MPPT do sistema, o programa do algoritmo foi implementado em uma plataforma de microcontrolador microchip PIC16F876A que controla o motor de indução acionado por um inversor. Neste algoritmo, a tensão de saída é regulada para um valor constante (V_{ref}) em todas as condições de funcionamento. A tensão de saída do PV (V_{PV}) é medida, se a tensão de saída for maior ou menor que tensão de saída constante definida, ocorre uma alteração na frequência, para que a relação V/f seja constante. O sistema estudado consiste num gerador DC ($V_{dc} = 106V$) para simular o gerador fotovoltaico; o motor de indução de potência 550 W, $V_{RMS} = 65V$, $\cos(\varphi) = 0,85$ e $f = 50$ Hz; um inversor com 2 kVA de potência, tensão de entrada 106 V, tensão de saída (RMS) 45-82V e $f = 8.5-57.5$ Hz; protótipo de placa de controle que integra os dois Microchip microcontrolador PIC 16876A e PIC 18f4550. O desenvolvimento do software envolve o uso da linguagem C, utilizando microcontrolador PIC, relacionado com o software MPLAB, ISIS Proteus e MatLab/Simulink. Os resultados obtidos mostraram alto desempenho do protótipo desenvolvido. O uso da técnica de SVM para controlar a tensão de saída do PWM, permitiu eliminar completamente os harmônicos de ordem inferior. A tensão do gerador fotovoltaico é mantida constante, em torno do valor pré-ajustado na placa de controle $V_{ref} = V_{MPP} = 109 V$, sob diferente irradiância [26].

Os autores R. Shaik; N. Beemkumar; H. Adharsha; K. Venkadeshwaran [27], projetaram um SBFV, a fim de aumentar a sua eficiência através do uso de um conversor de frequência. O projeto do sistema de seguimento solar consiste: numa matriz fotovoltaica com 8 painéis solares, com $250 W_p$ de potência cada, totalizando $2,2 kW_p$, um VFD conectado a um motor submersível, uma bateria de 12V, um conversor Buck, que converte os 12 V armazenados na bateria em 5 V exigido pelo Arduíno que regula a tensão a ser aplicada no atuador. O atuador serve para mover a estrutura do painel solar para a posição Leste e Oeste. O uso de VFD para análise de desempenho de SBFV ainda não está definida, pois é um campo emergente. A sua análise esta correlacionada com os parâmetros dos componentes do dispositivo eletrônico, a partir dos quais as conclusões do seu desempenho são tiradas. No estudo em causa analisado, os parâmetros alterados

para aumentar a eficiência do VFD foram: mudança do barramento DC; regularização da tensão de saída proveniente do VFD através de um regulador de tensão; instalação do VFD perto do motor para reduzir o comprimento do condutor, o que reduz a queda de tensão; aumento da qualidade dos cabos para reduzir os reflexos de saída. Os resultados mostraram que com as mudanças no VFD, houve um aumento na eficiência em cerca de 2–3% e o uso de estruturas de seguimento solar aumentou a produção geral de energia de 78,5 W para 150 W o que aumentou a eficiência em 90%. Em relação ao VFD, a relação entre tensão e frequência determina a quantidade de torque produzido por um motor de indução CA, para uma frequência acima da nominal de 50 Hz, a tensão não aumentará mais e o torque diminuirá. As características entre a eficiência e a carga, potência de saída com tensão de entrada, foi constante e observou uma tendência de aumento da eficiência atingindo pouco menos de 95%. Quanto ao custo do VFD, há 5% de economia de custos e 2% de melhoria de eficiência. O autor relatou também que a tecnologia de bombeamento de água fotovoltaica é uma alternativa confiável e economicamente viável para irrigação de plantações agrícolas; mais incentivos são necessários por parte dos governos; fatores que afetam o desempenho e técnicas de melhoria de eficiência, a técnica de MPPT de rastreamento solar e degradação do gerador fotovoltaico são áreas para pesquisas futuras para reduzir o custo, melhorar o desempenho e aumentar o tempo de vida do SBFV [27].

2.1.4. Otimização de Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico

A tecnologia de bombeamento de água fotovoltaica é considerada uma solução sustentável e econômica para fornecer água para irrigação. O projeto e a operação adequados dos sistemas dependem significativamente da irradiação solar disponível, da necessidade de água de cultura, dos recursos hídricos e do benefício correspondente da venda da cultura.

Uma técnica utilizada para otimizar os SBFVs, é o algoritmo genético (AG) [28], pode ser usado para otimizar problemas de engenharia multidimensionais e não lineares. O método fornece uma maneira fácil de chegar a soluções rápidas e viáveis, isto porque,

AG escolhe o valor ideal de cada parâmetro dentro dos limites superiores e inferiores definidos [29].

Campana, Li, J. Zhang, R. Zhang, Liu e Yan [28], realizaram estudos de otimização econômica de um sistema de bombeamento de água fotovoltaica para irrigação. O estudo propõe um método de otimização que leva em consideração não apenas a disponibilidade de recursos hídricos e o efeito do abastecimento de água na produção agrícola, mas também o custo de investimento do sistema de bombeamento de água fotovoltaica e a receita com a venda de culturas. A otimização através do algoritmo genético encontra o tamanho ideal dos SBFVs para irrigação usando uma função objetiva sob um pré-requisito. A função objetiva maximiza o lucro anual, através do equilíbrio entre a receita anual, o capital de investimento inicial, o custo anual da operação, manutenção e substituição dos equipamentos. O objetivo é maximizar o rendimento da cultura e conseqüentemente a receita anual, diminuindo o tamanho do sistema, que resulta na diminuição do investimento inicial, o custo de operação anual correspondente a manutenção e a substituição dos equipamentos. O estudo realizado pretende garantir a máxima confiabilidade e sustentabilidade do sistema durante toda a temporada de irrigação. A falha do sistema é definida quando o nível de água fica abaixo do nível da bomba (obtido a partir do nível de água estática) ou quando o volume diário bombeado de água é maior do que o volume diário sustentável de água bombeada delimitada pelo recurso hídrico local. Não considerando os parâmetros, o sistema pode facilmente ser sobredimensionado, o que resulta na seca do furo, visto que não foi respeitado o renovação natural do ciclo de água no furo, bem futuros danos à bomba. Além disso, o sobredimensionamento de um SBFV implica custos. Sendo assim, as variáveis definidas pelos autores, que decidem a otimização do sistema são: a capacidade de pico de energia fotovoltaica que tem efeitos diretos sobre os custos iniciais de investimento, volume de água bombeada, o rendimento da cultura e a receita anual. O problema de otimização encontra a solução ideal em termos de ângulo de inclinação, ângulo de azimute superficial e capacidade de pico de potência do PFV, permitindo aumentar o lucro sem violar a restrição do nível de água subterrânea. Os resultados obtidos, mostraram que o sistema de bombagem projetado foi sobredimensionado, isto porque, a água bombeada é maior do que a taxa de recarga do poço, o que gerou a diminuição do lençol freático. O problema de sobredimensionamento poderia ser evitado testando a taxa de recarga do furo antes da

instalação do sistema, considerando que a disponibilidade da água no poço pode variar de ano para ano, especialmente no período húmido ao seco. Outra questão observada foi a incapacidade de o sistema atender à necessidade de água durante a maior parte da estação de irrigação, devido a elevada variação na exigência de água. Este cenário mostra dois pontos paralelos do sistema, o seu sobredimensionamento, uma vez que a taxa de recarga do poço foi ultrapassada e subdimensionamento, porque não pode satisfazer as necessidades de água da cultura durante a temporada de irrigação. A otimização do sistema reduziu a energia fotovoltaica de $1,44 kW_p$, 9 módulos, para $0,96 kW_p$, 6 módulos; a otimização do ângulo de inclinação de 42 para 10° e azimute de -36 para 8° permite um aumento de 10% na saída do PV; a diminuição da matriz fotovoltaica, implica uma redução de 18,8% no custo de capital de investimento e, portanto, melhora claramente a viabilidade económica do SBFV. A diminuição no capital de investimento inicial no sistema foi de 4 800 \$ para 3 900 \$ quando otimizado. Os rendimentos anuais resultantes no final da temporada de irrigação são de 2,7 toneladas de DM/ha² para o sistema existente e 2,6 toneladas de DM/ha para o sistema já otimizado. A precisão dos resultados obtidos através da otimização por AG, dependerá principalmente da qualidade dos dados de entrada. A utilização do algoritmo genético para otimização de sistemas de bombagem fotovoltaica, garante um melhor conhecimento na performance geral do sistema, visto que, cenários de sobredimensionamento e subdimensionamento de sistemas de bombagem podem ser identificados, o que evita investimentos maiores e garante que os sistemas dimensionados sejam capazes de suprir as necessidades locais [28].

2.1.5. Desafios e Soluções

Apesar da sua utilização há anos e do seu uso em grande escala, os sistemas de bombeamento fotovoltaico ainda enfrentam alguns desafios, o que dificulta a sua aplicação mais ampla [10].

² DM/ha - Dry matter ou matéria seca por ha.

2.1.5.1.Capital

Geralmente 50 a 75% do capital total de um SBFV é requerido pelos geradores fotovoltaicos. O custo destes equipamentos está diretamente relacionado com a eficiência das células solares. Em condições STC, as células de silício cristalino possuem uma eficiência de 24,7% e as silício monocristalina 20,3%. Já em condições ambientais, a eficiência das células diminui de 3-5% devido ao reflexo de vidro, sombreamento, a variação da radiação entre outros. Sendo assim as células comercializadas possuem uma eficiência em torno de 15%. O investimento inicial de um SBFV é o principal obstáculo a ser superado nos países em desenvolvimento, porque a renda per capita é muito baixa em comparação com os países desenvolvidos. Empregar recursos materiais e financeiros locais, como materiais e mão de obra, ajudam a diminuir o custo inicial de investimento [10].

2.1.5.2.Problema de Operação e Manutenção (O&M)

A operação adequada e a manutenção regular de um sistema de bombeamento solar garante um maior tempo de vida útil do sistema. A maioria das falhas no sistema são causadas pela bomba, devido a areia presente no furo que afeta o seu funcionamento, por isso, a instalação de bombas que possuem malhas finas que filtram essas partículas, aumenta o seu tempo de vida útil e como consequência o tempo de vida útil de todo o sistema. Ao contrário das bombas, os painéis fotovoltaicos geralmente requerem menos manutenção, as baterias e outros componentes como seguidor solar requerem manutenção periódica.

O uso de seguidores solares, adiciona mais custos ao sistemas, o dispositivo é usado para ajudar a captar melhor a radiação solar durante o dia todo, entretanto a presença do vento no local interrompe o seguimento do dispositivo que nem sempre acompanha o Sol. Os sistemas mais simples que não possuem seguidores solares, reduz a manutenção em 25%. Com o objetivo de avaliar a confiabilidade dos SBFV, o autor realizou uma pesquisa em 46 sistemas instalados no México depois de 10 anos de funcionamento. Dos 46 sistemas, 18 sistemas 39,13% não estavam operando, 54,2% tiveram falha na bomba/motor e 20,8%/16,7% tiveram falha no controlador/inversor. Os cenários de falha descritos, podem ser resolvidos com a simples substituição da bomba/motor, controlador e outros componentes. A manutenção exigida pelos SBFV depende do tipo e da complexidade do

sistema, por isso, a instalação de sistemas simplificados devem ser prioritário sempre que possível [10].

2.1.5.3. Viabilidade Económica

O desafio em termos económicos que os SBFVs enfrentam, está relacionado ao elevado custo de capital, uma parcela considerável da qual se deve ao custo da energia fotovoltaica. No entanto, estes custos são reconhecidos como compensadores ao longo do tempo pelos custos mínimos de execução.

A viabilidade económica dos SBFVs, quanto comparada com as bombas a diesel e bombas manuais, apresenta um potencial bastante atrativo. Vários estudos realizados, alguns descritos anteriormente comprovam a viabilidade económica dos sistemas de bombeamento solar. Jamil et al. 2012, propôs um sistema de bombeamento de água solar de 20.000 \$ para atender às necessidades de água de uma instituição académica em Nova Delhi, Índia. O sistema possui um período de retorno de 4 anos, com vida útil estimada em 20 anos, podendo fornecer água gratuitamente por 16 anos [30].

Purohit e Kandpal et al. [31] estudaram a avaliação do desempenho financeiro de uma bomba de água solar fotovoltaica na Índia, estimando o valor de custo, a taxa interna de retorno do investimento, o custo unitário da água, os efeitos dos incentivos financeiros, (como o subsídio de capital), o imposto de renda relacionado à depreciação acelerada dos benefícios e a oferta de um empréstimo com juros baixos. O custo indica, que as bombas fotovoltaicas podem não ser financeiramente viáveis para os potenciais utilizadores na Índia. Concluíram que com as variações no preço do diesel e da eletricidade na Índia, torna necessário apoiar a adoção de bombas fotovoltaicas. Os sistemas de bombeamento fotovoltaico são opções viáveis quando incentivos suficientes são fornecidos pelo governo [31]. A sua viabilidade económica varia tanto dentro como entre os países, por isso, é um fator importante a ser levado em conta no dimensionamento de um SBFV [32].

2.2. Projeto de um Sistema de Bombeamento Fotovoltaico de água

O SBFV é constituído por diferentes componentes, painel fotovoltaico, conjunto motobomba e dispositivos eletrónicos, DC-DC ou DC-AC. Esses componentes apresentam características, funcionamento e desempenho diferentes [15]. Cada um desses componentes serão descritos em seguida.

2.2.1. Painel Fotovoltaico

A conversão da energia solar através da tecnologia fotovoltaica é uma das melhores formas de aproveitar a energia solar. Um dos componentes básicos de um sistema de bombagem de água movido a energia solar é a fonte de alimentação composta por painéis fotovoltaicos.

As células solares presentes no painel, quando expostas a luz produzem eletricidade de DC, a quantidade de corrente produzida por um painel fotovoltaico é muito mais sensível à intensidade da luz que atinge o painel do que a voltagem gerada. A potência de pico (watts = volts x amperes) é a potência máxima disponível do painel fotovoltaico a 1000 W/m² de irradiância solar (quantidade de luz do sol) a uma temperatura especificada, geralmente 25°C. A grosso modo, se reduzir pela metade a intensidade da luz, a saída de corrente DC reduzirá pela metade, mas a saída de tensão será reduzida apenas ligeiramente [33]. Para obter a obter a tensão ou corrente necessária, os painéis fotovoltaicos individuais podem ser ligados em série ou paralelo. Quando ligados em série, são atravessados pela mesma corrente e a característica resultante desta configuração é obtida pela soma das tensões aos terminais do painel como mostra as Equações (2.15) e (2.16)

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (2.15)$$

$$I = I_1 = I_2 = I_n \quad (2.16)$$

Quando a configuração de ligação dos painéis for em paralelo, a saída de tensão e corrente dos painéis conectados em paralelo é exatamente o oposto dos painéis

conectados em série. Os painéis estão submetidas à mesma tensão e as intensidades de corrente são somadas, como mostra as Equações (2.17) e (2.18) [33] [34].

$$V = V_1 = V_2 = V_n \quad (2.17)$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (2.18)$$

A energia extraída de um módulo fotovoltaico depende das condições climáticas em que o painel é exposto. Com o objetivo de maximizar a produção energética, as matrizes fotovoltaicas podem ser equipados com: painéis fixos ou seguidores solares. Ao contrário dos SBFV de montagem fixa (sem seguidor solar) que são montados em estruturas metálicas inclinadas com um ângulo de inclinação fixa, ou seja, ângulo de latitude do local de bombeamento. Os SBFV com seguidor solar, varia a sua inclinação ao longo do dia. O ajuste é feito no início da manhã, ao meio-dia e à tarde para aumentar a radiação solar incidente na superfície do painel solar. O uso de um seguidor solar pode aumentar quase 25-50% a produção total do sistema de bombeamento [14].

2.2.2. Motor

Os motores utilizados nos sistemas de bombeamento solar podem ser de corrente contínua ou corrente alternada, com ou sem escovas, ímã permanente ou relutância variável, síncrono ou assíncrono.

2.2.2.1. Motor de Corrente Contínua (DC)

Os motores DC são atraentes porque são compatíveis com a saída do painel fotovoltaico, por isso, são ligados diretamente ao painel - acoplamento direto, sendo este o cenário mais simples em um sistema fotovoltaico de bombeamento. O uso de motores DC com escovas em SBFV, não é considerado vantajoso, uma vez que sofrem desgaste natural ao longo da sua utilização, por isso, é preciso uma manutenção periódica para substituir as escovas, a manutenção e substituição das escovas requer a retirada da bomba já instalada no poço, o que aumenta os custos de funcionamento e manutenção e também reduz a sua confiabilidade e vida útil. Os motores DC sem escova foram feitos para superar essas

desvantagens, aumentam a viabilidade do sistema e reduz a necessidade de manutenção. O motor é formado por ímãs permanentes e o estator por eletroímã. Quando os eletroímãs são suficientemente energizados o rotor gira. A eficiência dos motores DC é geralmente mais elevada quando comparada com os motores AC, entretanto o seu custo inicial é mais elevado e o motor com escova precisa de manutenções periódicas o que aumenta ainda mais o custo de manutenção [33] [34].

2.2.2.2. Motor de Corrente Alternada (AC)

Um sistema fotovoltaico de bombagem conectado a motores AC, possui mais complexidade ao sistema pela inclusão de um inversor, que serve para converter a DC produzida pelos painéis fotovoltaicos em corrente alternada para alimentar o motor AC. São motores assíncronos, chamados também de motores de indução e possuem uma eficiência média de 85%. O seu uso deve-se a sua ampla disponibilidade, em uma larga escala de potência e baixos custos. São geralmente utilizados em SBFV submersos, adequados para grandes profundidades. O motor é acionado pelo inversor dimensionado para fornecer a frequência variável capaz de ajustar a tensão de saída do gerador à carga do motor AC [34].

2.2.3. Bomba

As bombas convencionais requerem motores de corrente AC e as bombas solares usam corrente DC de baterias e/ou painéis fotovoltaicos. Existem duas categorias de bombas que podem ser utilizadas em sistemas isolados: as bombas centrífugas e as bombas volumétricas. A bomba encontra-se acoplada a um motor, designado conjunto motobomba, por isso, a escolha da bomba é acompanhada pela escolha do motor. O conjunto deve ser dimensionado para funcionar com a máxima eficiência nas condições de funcionamento desejadas, altura manométrica e caudal. Na sua seleção deve ser levado em conta algumas características importantes do sistema: a potência necessária para atingir a altura manométrica requerida, o volume de água necessário, a necessidade de estar submersa ou não, a pressão de funcionamento de bomba, a dimensão do poço, a eficiência, o custo, a confiabilidade, a disponibilidade e a facilidade para a realização da manutenção [33].

Os conjuntos motobomba mais comumente usados são os motores AC com bombas centrífugas e o motor DC com bomba de deslocamento positivo [35]. No entanto, os SBFV de primeira geração (configuradas com bombas centrífugas) acionadas por motores DC-AC apresentam uma eficiência hidráulica que varia de 25% a 35%, enquanto os SBFV de segunda geração (configuradas com bombas de deslocamento positivo, bombas de cavidade progressiva ou bombas de diafragma) apresentam uma eficiência hidráulica superior, de até 70% [14].

2.2.3.1. Bomba Centrífuga

São bombas de deslocamento não-positivo usadas para transferir fluídos e cuja única resistência é a criada pelo peso do fluido e pelo atrito, a movimentação do fluido acontece devido à ação de forças que se desenvolvem na bomba, em consequência da rotação do eixo no qual é acoplado um disco (rotor, impulsor) dotado de pás (palhetas, hélice).

As bombas centrífugas são instaladas em sistemas que exigem grande volume de água, ou seja, um caudal elevado e uma altura manométrica pequena. São projetadas para alturas manométricas fixas, uma vez que a eficiência da bomba diminui para altura manométrica e caudal diferente ao longo do circuito. As bombas centrífugas são separadas em duas classes: as submersíveis e as não submersíveis. As bombas submersíveis como o nome indica, trabalham totalmente submersas na água. Já as bombas não submersas são instaladas na superfície do furo e necessitam de um tudo de sucção para que a água seja bombeada. Quando acionadas por motores DC, as bombas centrífugas adequam-se bem a saída do gerador fotovoltaico à medida que a corrente elétrica aumenta maior é o caudal fornecido. O seu desempenho é muito sensível a radiação solar, assim o caudal aumenta com o aumento da radiação solar, qualquer mudança na irradiação resulta na mudança de caudal da bomba. Pode ocorrer da não conseguir superar a altura manométrica do sistema, ocorrendo a interrupção do bombeamento até que os níveis de irradiação retornem a valores suficiente elevados para fazer trabalhar a bomba.

2.2.3.2. Bomba volumétrica

As Bombas Volumétricas ou como bombas de deslocamento positivo dividem-se em: êmbolo ou Alternativas (pistão, diafragma, membrana); rotativas (engrenagens, lóbulos, palhetas, helicoidais, fusos, parafusos, peristálticas. São bombas em que movimentação do fluído é causada diretamente pela ação do órgão de impulsão da bomba (êmbolo, engrenagens, lóbulos, palhetas) que obriga o fluído a executar o mesmo movimento a que está sujeito o impulsor, por isso, a designação de deslocamento positivo. Durante o funcionamento o fluído ocupa e desocupa espaços no interior da bomba, com volume conhecido, disso, a designação de bomba volumétrica. Muitos sistemas de bombeamento solar usam bombas volumétricas. Ao contrário das bombas centrífugas, são adequadas para sistemas que requerem grandes alturas manométricas e pouco volume de água, a sua eficiência aumenta com o aumento da altura manométrica, o seu desempenho não depende da altura manométrica, como acontece com as bombas centrífugas.

A variação nos níveis de irradiação sobre o gerador fotovoltaico diminui a velocidade do motor que, conseqüentemente, diminui o caudal do sistema. Diferente do que acontece com as bombas centrífugas acionadas por motores DC, as bombas volumétricas não se ajustam tão bem à saída do gerador fotovoltaico, por isso, não pode ser ligada diretamente aos geradores fotovoltaicos, o que torna necessário o uso de dispositivo de conversão de corrente (inversor DC-AC) entre o gerador fotovoltaico e o motor para ajustar o ponto operacional do gerador fotovoltaico e fornecer a corrente necessária para a partida do motor. O dispositivo permite que o motor opere para diferentes faixas de níveis de irradiação, alturas manométricas e caudais. As bombas de diafragma são as mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos de altura manométrica baixa, as bombas de pistão com contrapeso, designadas também de bombas cavalete ou as bombas de cavidade progressiva ou bombas parafuso, são utilizadas em sistemas que possuem elevada altura manométrica. São instaladas em sistemas que necessitam de caudal na faixa de 0,3 a 40 m^3/dia e alturas manométricas entre 10 á 500 metros [33] [36].

2.2.4. Dispositivos de Eletrônica de Potência

Como já observado em alguns estudos mencionados anteriormente, a maioria dos SBFV utilizam dispositivos de condicionamento de potência, instalados entre a matriz fotovoltaica e o conjunto motobomba. No geral são instalados conversores DC-DC em sistemas de corrente contínua e conversores DC-AC em sistemas de corrente alternada, assim como conversores de frequência [37].

2.2.4.1. Conversor DC-DC

O conversor DC-DC é um dispositivo eletrônico que serve para regular a energia em DC fornecida aos motores, ajustando as variáveis tensão e corrente elevando-as ou reduzindo-as segundo os requerimentos do conjunto motobomba [14]. Alguns conversores são configurados para trabalhar na tensão de entrada no MPP da curva I-V do gerador fotovoltaico para as diferentes condições de temperatura, irradiação e carga, são denominados de conversores DC-DC com MPPT. O seu desempenho está relacionado com a matriz fotovoltaica e as condições climáticas, normalmente, a eficiência varia entre os 80% até os 95% [38].

2.2.4.2. Inversor DC-AC

Um inversor DC-AC, é usado para transformar a DC fornecida pelo gerador fotovoltaico em AC [39]. É projetado especificamente para SBFV pois necessita de frequências e tensões de saída variáveis, ao contrário dos inversores para ligação a rede elétrica usados em aplicações fotovoltaicas, que possuem frequências e tensões de saída constantes. Entretanto muitos inversores no mercado só operam com tensões de entrada estáveis, o que torna necessário o uso de baterias ou conversores DC-DC para seu melhor funcionamento. O inversor pode incluir sistemas de MPPT e gerar uma tensão monofásicas ou trifásica para fornecer ao motor uma relação de frequência e tensão constante [40].

2.2.4.3. Conversor de frequência AC-AC

O conversor de frequência (CF) é um equipamento eletrônico capaz de controlar a velocidade e o binário de um motor de indução, variando a frequência e a tensão de alimentação do motor. Tem um circuito eletrônico similar ao inversor DC-AC, diferindo na transformação da corrente contínua em corrente alternada com frequência variável [41]. É usado amplamente no setor industrial para o controle de processos, mas também pode ser utilizado em aplicações fotovoltaicas que utilizem motores de indução trifásicos como os sistemas de bombeamento, pois permite condicionar a rotação do motor a valores variáveis em função da potência de entrada e permite também um acoplamento direto a uma fonte de DC sem necessidade de equipamentos adicionais [37]. Isto é possível porque, o retificador converte a tensão trifásica AC em tensão DC, a bateria de condensadores do circuito intermédio estabiliza a tensão DC, o inversor converte a tensão DC de novo para tensão AC para alimentar o motor AC, o chopper de travagem serve para ligar a resistência de travagem externa ao circuito intermédio DC quando a tensão no circuito excede o seu limite máximo. O diagrama simplificado de circuito principal do conversor de frequência está representada na figura 3 [42].

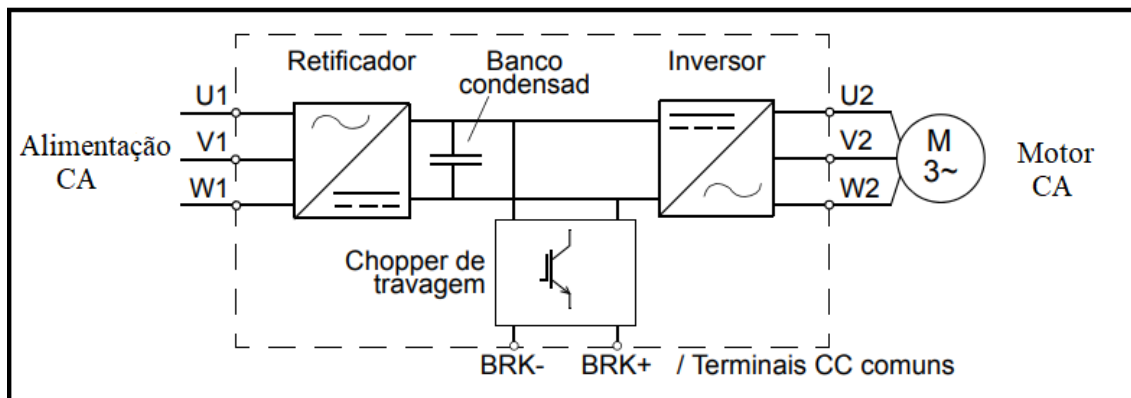


Figura 3- Diagrama simplificado do circuito do CF. Fonte: [42]

Capítulo 3

3. Materiais e Métodos

Este capítulo apresenta a necessidade de água diária das plantações; o dimensionamento do sistema de bombeamento fotovoltaico de acordo com a necessidade de consumo de água diário; o cálculo do número de módulos, o dimensionamento do conversor de frequência, dos condutores elétricos e dos dispositivos de proteção. Assim como o dimensionamento dos furos de captação e a configuração de ligação dos furos.

3.1. Dimensionamento Fotovoltaico

O presente SBFV, tem como função irrigar uma determinada área de cultivo, através de furos de captações de águas subterrâneas. O dimensionamento de um SBFV é realizado tendo em conta o volume de água necessário e a altura total de bombagem, como foi analisado no capítulo 1. O furo ou os furos de captações presentes do local, terão de satisfazer as necessidades diárias de água do campo de cultivo. Uma vez que as características hidrogeológicas e geomorfológicas do local do projeto não são conhecidas, foi traçado um cenário com 3 furos no local, que variam em profundidade e volume máximo de bombagem. Para cumprir a norma de distanciamento³ entre os furos, aplicada em Cabo Verde, os mesmos terão de possuir uma distância de 50 m entre si. As demais características dos furos serão descritas seguidamente.

3.1.1 Necessidade de água

A parte primordial do dimensionamento de um Sistema de Bombeamento Fotovoltaico é a estimativa do consumo diário de água da área de plantação, isto porque, todo o dimensionamento do sistema de geração, deverá ter em conta a necessidade de água para a irrigação [34]. O cálculo do volume necessário de água foi baseado na quantidade de água que cada tipo de plantação necessita por hectare. A área de cultivo será ocupada por

³ Valor obtido em uma reunião com o Administrador-Executivo António Pedro Pina da ANAS-Agência Nacional de Água e Saneamento em Cabo Verde, no dia 13/01/20 na Cidade da Praia, Cabo Verde.

plantações de banana, cebola, feijão e milho. A escolha dessas plantações justifica-se por serem algumas das mais existentes em Cabo Verde [43].

Na Tabela 1 é possível ver o litro de água que as plantações requerem por hectare ocupado por dia (ha/dia), sendo o milho a plantação que necessita de uma maior quantidade de água com 50 000 litros ha/dia e a cebola com menor quantidade de água com 45 000 ha/dia.

Tabela 1 - Necessidade de água por hectare para as diferentes plantações. Fonte: [34].

Tipo de Plantação	Litros (ha/dia)
Banana	46 500
Cebola	45 000
Feijão	48 000
Milho	50 000

As plantações ocupam uma área equivalente a 2 hectares, distribuídas uniformemente. A Tabela 2 contém a área ocupada por cada plantação e a necessidade de água que cada uma requer pela área ocupada. O volume total de água diária necessária para irrigar a área de cultivo de 2 hectares é de 94 750 l ou 94,75 m³.

Tabela 2 - Área ocupada pela plantação e a sua necessidade de água.

Tipo de Plantação	Área da Plantação (ha)	Água Necessária (L)	Água Necessária (m³)
Banana	0,5	23 250	23,25
Milho	0,5	25 000	25
Feijão	0,5	24 000	24
Cebola	0,5	22 500	22,5
Total	2	94 750	94,75

Para melhor entender as necessidades do local, foi feita a distribuição do volume de água necessária por hora, por mês e por ano da área de plantação como mostra a Tabela 3. A distribuição por hora foi feita considerando as horas de sol pleno (HSP) disponível no local, tendo em conta o valor da média mensal de irradiação de 6,02 kWh m²/mês em Cabo Verde, o HSP foi definido em 6 horas. Sendo assim, a distribuição de água por hora foi obtido através da divisão do volume de água diário pelo HSP, o produto da distribuição de água por hora com o número de dias (31) equivalente a um mês, resultou na

distribuição mensal. Já a necessidade de água anual, resultou do produto da distribuição de água necessária por mês e dos doze meses disponíveis num ano, correspondente a número de meses num ano.

Tabela 3 - Distribuição do volume de água necessário, por hora, dia, mês e ano em m³.

Distribuição de água	Volume (m ³)
Por hora	15,79
Por dia	94,75
Por mês	2 937,25
Por ano	34 583,75

Para que o limite máximo de extração da água dos furos seja respeitado, é necessário que se conheça a capacidade máxima disponível ($V_{máx}$) de cada um dos furos, sendo assim, foram estimados os valores correspondente a cada um dos furos para que o regime de reposição de água do poço não seja alterado, causando a diminuição do lençol freático, como aconteceu no estudo de Campana et Al. [28]. A limitação do volume de água bombeado pelos furos, garante que os mesmos fiquem ativos por mais tempo. Com o objetivo de avaliar e conhecer diferentes cenários, cada um dos furos possuirá uma profundidade diferente assim como o volume bombeado pelo mesmo, a Tabela 4 mostra a profundidade o volume máximo possível bem como o volume a ser bombeado por cada furo. A profundidade dos furos já existentes no local do projeto alimentado com motores diesel, varia entre 100 à 200 m, por isso, os valores estimados para os furos em estudo encontram-se dentro do padrão de valores de profundidade dos furos existentes na localidade⁴.

Tabela 4 - Caracterização dos furos de acordo com o volume e a profundidade.

Designação	Profundidade (m)	Volume (m ³ /dia)	Volume Máximo (m ³)
Furo 1	100	50	70
Furo 2	150	30	50
Furo 3	200	20	40
Total		100	

⁴ Valor obtido em uma reunião com o Administrador-Executivo António Pedro Pina da ANAS-Agência Nacional de Água e Saneamento em Cabo Verde, no dia 13/01/20 na Cidade da Praia, Cabo Verde

Para que satisfação da necessidade de água diária não seja comprometida, uma vez que tanto a eficiência do conjunto motobomba como da matriz fotovoltaica não é 100%, como foi relatado pelo Hamidat et al. [44], o volume de água fornecido pelos 3 furos será de $100 m^3$, maior que os $94,75 m^3$ necessário. O furo 1 é responsável por satisfazer 50% da necessidade diária, bombeando $50 m^3$ de água por dia, o furo 2 e 3 fornecerá 30% e 20% da necessidade bombeando $30 m^3$ e $20 m^3$ de água respectivamente. Sendo assim, todos os cálculos necessários serão feitos considerando as características de cada um dos furos. Todos os valores do dimensionamento foram obtidos através da implementação das equações descritas no estado da arte (capítulo 1).

3.1.2. Cálculo da Energia Hidráulica Necessária

Para calcular a energia hidráulica aplicando a Equação (2.1), é preciso conhecer algumas características dos furos, como o nível estático e dinâmico do furo, o comprimento, o diâmetro e os componentes de conexão da tubagem (válvula de retenção e joelho). Uma vez que o cálculo da E_h implica o conhecimento do diâmetro da tubagem, recorreu-se a valores tabelados que definem o diâmetro da tubagem de acordo com o caudal (Q em m^3/h) de água pretendido, bem como os acessórios de conexão. Primeiramente foi definida as características acima mencionadas para cada um dos furos, como mostra a Tabela 5, uma vez que o SBFV em causa possui reservatórios para o armazenamento da água bombeada, a altura da tubagem da saída do furo até o reservatório (H_r) também foi considerado na altura dinâmica total de bombagem para o cálculo das perdas.

Tabela 5 - Características dos furos.

Característica dos furos			
	Furo 1	Furo 2	Furo 3
$Q (m^3/h)$	8,23	5	2,86
$Q (l/h)$	7 142,90	4 285,70	2 857,10
$H_e (m)$	55,46	80,46	110,46
$H_d (m)$	8	6	4
$H_r (m)$	20	15	10

A Tabela 6 representa os valores de diâmetros necessários na tubagem em PVC de acordo com o caudal e as suas respetivas perdas a cada 100 m de altura de bombagem.

Tabela 6 - Perdas de carga nas tubulações em PVC. Fonte: [34].

Perdas de carga (perda equivalente em metros de altura manométrica para cada 100 m de tubulação)							
Caudal (L/h)	Diâmetro interno da tubulação (mm)						
	19	26	32	38	50	63	75
500	1,15						
1000	4,65	1,15	0,23				
2000	22,2	5,3	1,43	0,55			
3000		9,9	2,5	1	0,5	0,18	
4000		16,25	4,55	2	0,83	0,38	0,14
5000			6,45	2,6	1,15	0,48	0,17
6000			9,25	4,3	1,55	0,58	0,2
7000			12,85	5,45	2	0,68	0,25
8000			16,6	7,5	2,5	0,9	0,3
9000				9,45	3,05	1,13	0,4
10000				12,5	4,25	1,4	0,58
12000				15,45	5,45	1,9	0,75
15000				23,5	8,1	3	1,18

Já na Tabela 7 consta os valores das perdas referentes a cada acessório de conexão de acordo com o diâmetro.

Tabela 7 - Perdas de carga nas conexões em PVC. Fonte: [34].

Perdas de carga (m) por tipo de conexão - Equivalência em metros lineares de tubulação)			
Conexão	Diâmetro interno da tubagem (mm)		
	32	50	63
Joelho 45°	0,274	0,457	0,61
Joelho 90°	0,457	0,762	1,067
T	0,762	1,067	1,524
Válvula Globo	7,62	13,716	16,764
Válvula Gaveta	0,183	0,305	0,396
Válvula de retenção	0,914	1,524	2,134

Na escolha das secções das tubagens, para além de levar o caudal em conta, a escolha foi feita diminuindo ao máximo possível a secção das tubagens, uma vez que o aumento no diâmetro implica um aumento no preço. A Tabela 8 contém o valor das secções de tubagens escolhidos para cada um dos furos.

Tabela 8 - Diâmetro da tubagem PVC para os furos.

Designação	Q (l/h)		Ø (mm)
Furo 1	8 333,3	≈ 9000	38
Furo 2	4 285,7	≈ 5000	38
Furo 3	2 857,1	≈ 3000	32

A ligação hidráulica de cada furo consiste em três joelhos de 90° para o conexão das tubagens, desde a saída do furo até a entrada no reservatório e uma válvula de retenção, as perdas correspondentes para cada um desses acessórios estão na Tabela 9.

Tabela 9 - O número de conexões necessário nas tubagens e as respectivas perdas.

Conexão			
Tipo	Ø (mm)	Perda	Número
Joelho 90°	32	0,457	3
Válvula de retenção	32	0,914	1

Conhecendo a seção das tubagens e o fator de perdas nas conexões, é possível aplicar as Equações (2.2)-(2.9). A rugosidade relativa para o tubo PVC utilizado neste estudo é de 0,0015 [45].

Aplicando as Equações (2.6) e (2.7), é possível conhecer a velocidade e o número de Reynolds de cada um circuito hidráulico. Visto que valor do número de Re se encontra na condição: $2000 < Re < 10^5$, aplicou-se a Equação (2.9), na qual o valor do atrito resultou de uma análise de hipóteses realizada no Excel. A maior velocidade do fluido é encontrada no circuito hidráulico do furo 1, com 2,023 m/s, assim como o maior número de Re , 189 090,73, já o coeficiente de atrito é o menor, 0,0229. O circuito hidráulico do furo 3 apresenta a menor velocidade, com 0,987 m/s, bem como o número de Re de 75 636,29, porém o coeficiente de atrito é o maior com 0,0243, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 - Velocidade, Número de Reynolds e coeficiente de atrito do circuito hidráulico do furo 1, 2 e 3.

Designação	Velocidade (m/s)	Número de Reynolds	Coeficiente de atrito
Furo 1	U_1 2,023	Re_1 189 090,73	λ_1 0,0229
Furo 2	U_2 1,224	Re_2 113 454,44	λ_2 0,0235
Furo 3	U_3 0,987	Re_3 75 636,29	λ_3 0,0243

Conhecendo todos os valores acima mencionados, é possível aplicar as Equações (2.2)-(2.4) e conhecer as perdas que ocorrem no circuito e a altura total de bombagem para cada um dos furos. Assim como mostra Tabela 11, o furo 1 possui a menor altura de bombagem com 84,94 m, porém, a perda total no circuito é maior, 1,48. Já o furo 3 possui a maior altura total de bombagem com 124,94 m e uma perda total de 0,49. Com uma altura total de bombagem de 102,10 m, o furo 2 registra uma perda no circuito hidráulico de 0,64.

Tabela 11 - Perdas ocorridas no circuito hidráulico e a altura total de bombagem dos furos.

Designação	ΔH_1	ΔH_2	H_f	H
Furo 1	1,48	0,477	1,48	84,94
Furo 2	0,64	0,174	0,64	102,10
Furo 3	0,49	0,114	0,49	124,94

Aplicando a Equação (2.1), a maior energia hidráulica obtida é requerida pelo furo 1, com 41 590,04 kWh seguido pelo furo 2 com 29 992,75 kWh, já a menor energia hidráulica é requerida pelo furo 3 com 24 471,80 kWh como mostra a Tabela 12.

Tabela 12 - Energia hidráulica requerida no furo 1, 2 e 3.

Designação	E_h (kWh)
Furo 1	41 590,04
Furo 2	29 992,75
Furo 3	24 471,80

Para garantir uma maior segurança a nível dos cálculos realizados, para além da aplicação das equações descritas no Capítulo 1, realizou-se cálculos aplicando outras equações referidas em [34], o que permite avaliar ambos os resultados e determinar o grau de diferença entre o primeiro e o segundo método aplicado. Para o cálculo da energia hidráulica (E_H) expressa em W_h/dia , é necessário conhecer novamente a altura manométrica (h_m) e a altura monométrica corrigida (H_{mc}) que corresponde a altura monométrica, somada as perdas nas tubulações (h_t) e nas conexões (h_c). Sendo assim aplicou-se a Equação (3.1) que expressa a energia hidráulica, a equação (3.2) expressa a altura monométrica corrigida, (3.3) expressa a altura manométrica. Onde h_r corresponde a altura do reservatório e h_d é a distância entre o nível do solo e o nível de água durante o bombeamento. Aplicando a Equação (3.4) é possível conhecer as perdas que ocorrem ao tubulações, onde h é a perda que ocorre ao longo da tubagem (L_c) a cada 100 m, de acordo com o diâmetro do tubo e o caudal, expressa pela Equação (3.5) onde $L_{tubulação}$ é o comprimento da tubagem, $L_{válvula}$ é a perda que ocorre na válvula e L_{joelho} a perda que ocorre no joelho de conexão.

$$E_h = 2,275 * Q * H_{mc} \quad (3.1)$$

$$H_{mc} = h_m + h_t + h_c \quad (3.2)$$

$$h_m = h_r + h_d \quad (3.3)$$

$$h_t = h * \frac{L_c}{100} \quad (3.4)$$

$$L_c = L_{tubulação} + L_{válvula} + L_{joelho} \quad (3.5)$$

Na figura 4 encontra-se ilustrada o esquema de ligação de um furo de captação de água subterrânea ligado a um reservatório bem como a representação das incógnitas necessárias para a realização dos cálculos.

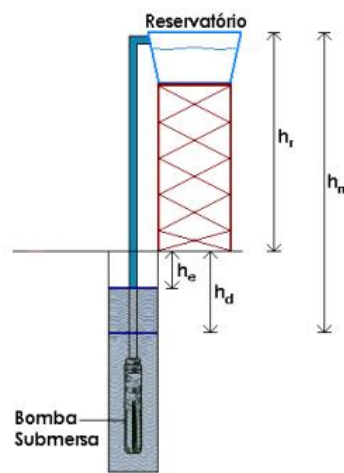


Figura 4- Esquema de um furo de captação de água subterrânea ligado a um reservatório. Fonte: [34]

Para conhecer as perdas que ocorrem nas tubagens de acordo com a seção, recorreu-se novamente a Tabela 6. A Tabela 13 contém a seção das tubagens escolhidas bem como as suas perdas para cada um dos furos, sendo os mesmos escolhidos no primeiro método de cálculo aplicado.

Tabela 13 - Seção das tubagens e as respetivas perdas do furo 1, 2 e 3.

Designação	Q (l/h)		Ø (mm)	Perda a cada 100 m	
Furo 1	8 333,3	≈	9000	38	7,5
Furo 2	4 285,7	≈	5000	38	2,6
Furo 3	2 857,1	≈	3000	32	2,5

Aplicando as Equações (3.2)-(3.5) do segundo método de cálculo, obteve-se a altura manométrica de cada circuito hidráulico, as perdas nas tubagens e nas conexões, bem como a altura manométrica corrigida. Os valores referentes a altura total de bombagem ou altura manométrica corrigida de cada furo, é maior quando comparada com os valores obtidos no primeiro método de cálculo aplicado, como mostra a Tabela 14. Para o furo 1 o valor obtido foi de 93,848 m contra os 84,94 m, para o furo 2 106,442 m contra os 102,10 m e para o furo 3 130,104 m contra os 124,95 m. A maior diferença observa-se no furo 1 com 8,9 m de diferença, já para o furo 2 e 3 a diferença é de 4,35 e 5,16 m. Considera-se uma diferença aceitável entre os dois métodos.

Tabela 14 - Perdas ocorridas na tubagem, nas conexões e a altura manométrica corrigida do furo 1, 2 e 3.

Designação	h_t	h_c	T_{perdas}	H_{mc}
Furo 1	8,103	2,285	10,39	93,848
Furo 2	2,697	2,285	4,98	106,442
Furo 3	3,359	2,285	5,64	130,104

A energia hidráulica requerida em cada furo quando aplicada a Equação (3.1), é de 10,675 kW_h para o furo 1, 7,264 kW_h para o furo 2 e 5,519 kW_h para o furo 3, valores significativamente inferiores aos valores encontrados no primeiro método. Para o furo 1 a diferença chega a ser de 30,664 kW_h e para o furo 2 e 3 a diferença é de 22,664 kW_h e 18,518 kW_h respetivamente, ver tabela 15.

Tabela 15 - Energia hidráulica do furo 1, 2 e 3 obtido pelo segundo método de cálculo aplicado.

Designação	E_h (kW _h)
Furo 1	10,675
Furo 2	7,264
Furo 3	5,519

3.1.3. Cálculo da Energia Fotovoltaica Necessária

Para conhecer a energia fotovoltaica, é necessário conhecer o fator de incompatibilidade da matriz e a eficiência do conjunto motobomba através da aplicação a Equação (2.1), o fator de incompatibilidade da matriz foi estimado em 30% [17]. Conhecendo o volume

de água necessário por hora, bem como a altura dinâmica total de bombagem ou altura manométrica total de cada furo, é possível selecionar o conjunto motobomba a ser instalado. Na Tabela 16 constam as características do conjunto motobomba escolhido para cada um dos furos, a eficiência do conjunto foi traçado de acordo com a curva de potência de cada um, sendo esse valores utilizados para o cálculo da energia fotovoltaica necessária.

Tabela 16 - Características do conjunto motobomba escolhido para o furo 1, 2 e 3.

Designação	Conjunto motobomba					
	Marca	Modelo	Potência (kW)	TDH	Volume (m ³ /h)	Eficiência (%)
Furo 1	Grundfos	SP 9-23	5,5	110	9	55
Furo 2		SP 7-27	4	124	7	52,4
Furo 3		SP 5A-38	4	155	5	45,3

Para aplicar a Equação (2.1), é necessário conhecer também a média da irradiação solar diária (I_T em kWh/m^2 dia) em Cabo Verde. No entanto os dados obtidos são referentes a irradiação media mensal solar, representados na Tabela 17, por isso, para o cálculo da energia fotovoltaica necessária foi usado como base a média do pior mês a nível de irradiação, no caso o mês de dezembro, com uma média de $4,77 kWh/m^2$.

Tabela 17 - Radiação solar mensal em Cabo Verde. Fonte: [46].

Mês	Irradiação Solar Mensal kWh/m^2
Janeiro	5,06
Fevereiro	5,77
Março	6,65
Abril	6,99
Maio	7,04
Junho	6,55
Julho	6,29
Agosto	6,28
Setembro	6,07
Outubro	5,71
Novembro	5,02
Dezembro	4,77
Média Anual	6,02

Aplicando agora a Equação (2.1), o furo 1 requer a maior energia fotovoltaica, com $5,284 kW_p$, seguido pelo furo 2 com $3,999 kW_p$ e com uma menor potência o furo 3, com $3,775 kW_p$.

O segundo método de cálculo aplicado, converte a energia hídrica em energia elétrica primeiramente, para em seguida obter a energia fotovoltaica requerida nos furos. A energia elétrica (E_{EL}) é dada em W/mês, através da relação energia hídrica e eficiência do conjunto motobomba (η_{mb}), como mostra a Equação (3.6). A eficiência do conjunto motobomba, são valores tabelados descrito de acordo com o tipo de bomba utilizado no SBFV, como é possível ver na Tabela 18.

$$E_{EL} = \frac{E_h}{\eta_{mb}} \quad (3.6)$$

Tabela 18 - Valores de eficiência para configurações de SBFV com diferentes tipos de bombas.

Fonte: [34]

Altura (m)	Tipo de bomba	Eficiência
5	centrífuga de superfície	25%
20	centrífuga de superfície	15%
20	submersível	25%
100	submersível ou deslocamento positivo	35%
>100	deslocamento positivo	45%

Os furos 2 e 3 possuem alturas manométricas maiores que 100 m, já o furo 1 possui uma profundidade de 100 m. A eficiência para SBFV com bombas de deslocamento positivo para alturas maiores de 100 m é de 45% e para alturas de 100 m a eficiência é de 35%. Aplicando a Equação 3.6, a energia elétrica requerida no furo 1, 2 e 3 são $23,722 kW_h$, $16,143 kW_h$ e $13,154 kW_h$ respectivamente.

Conhecendo a energia elétrica (E_{EL}) e as Horas de Sol Pleno, é possível conhecer a energia fotovoltaica requerida em cada furo aplicando a Equação (3.7).

$$E_{FV} = 1,25 * \frac{E_{EL}}{HSP} \quad (3.7)$$

A HSP disponível em cabo Verde, foi estimada tendo em conta o valor da média anual de irradiação do mês de dezembro, $4,77 \text{ kWh/m}^2$, obtido através da Tabela 17. Sendo assim, aplicando a Equação (3.7), a energia fotovoltaica requerida nos furos é maior em relação ao primeiro método de cálculo aplicado, para o furo 2 e 3 com $4,035 \text{ kW}_p$ e $3,157 \text{ kW}_p$ respetivamente, já para o furo 1 a energia requerida é maior, com $7,320 \text{ kW}_p$. A diferença na energia fotovoltaica requerida pelos furos entre os dois métodos, chega a ser de $2,035 \text{ kW}_p$ para o furo 1 e de $0,0361 \text{ kW}_p$ para o furo 2 e $0,617 \text{ kW}_p$ para o furo 3. A energia fotovoltaica requerida é diretamente influenciado pela eficiência do conjunto motobomba, o aumento da eficiência implica uma diminuição na energia fotovoltaica. No primeiro método a eficiência dos conjuntos motobombas foram escolhidas de acordo com a curvas de potências dos conjuntos, valores esses que variam de acordo com a altura total de bombagem. Para o furo 1 e 2 a eficiência atingida pelo conjuntos motobomba é de 55 e 52,4%, contra o valor tabelado do segundo método de 35%, o que explica a maior energia fotovoltaica requerida através do segundo método. Já para o furo 3 a eficiência é igual, 45%. O único furo 3 em que a energia fotovoltaica requerida é menor no segundo método, quando comparado primeiro método. Considera-se que a diferença na energia fotovoltaica obtida entre os dois métodos é aceitável, uma vez que os valores se encontram bastante próximos

3.1.4. Cálculo do Número de Módulos Fotovoltaicos Necessários

Para determinar o número de painéis necessários para satisfazer a necessidade energética é necessário conhecer as características do mesmo. O módulo escolhido foi o Akcome 330 W_p , contém 72 células do tipo monocristalino, com 330 W_p de potência nominal e uma eficiência de 17%, as demais características estão na Tabela 19.

Tabela 19 - Características técnicas do módulo o Akcome 330 kW.

Dados do Painel Fotovoltaico Akcome 330 W						
Equipamento	Marca	Modelo	Características Técnicas			
Módulo Fotovoltaico	Akcome	SK6612P	Potência nominal	P_N	330	W
			Tensão Nominal	V_{MPP}	37,1	V
			Corrente nominal	I_{MPP}	8,80	A
			Tensão de circuito aberto	V_{oc}	45,7	V
			Corrente de curto-circuito	I_{sc}	9,38	A
			Eficiência do Modulo	ϵ	17	%
			Temperatura de Operação	T_{min}	-40	
	$T_{máx}$	85	°C			

Conhecer as características do módulo fotovoltaico é vital para poder realizar as estimativas da quantidade de energia gerada logo a quantidade de água bombeada, também permite verificar a compatibilidade de ligação com outros componentes do sistema fotovoltaico [47]. Com o módulo fotovoltaico escolhido e conhecendo a sua potência nominal (P_N) como a energia fotovoltaica (E_{FV}) é possível determinar o número de módulos necessário através da Equação (38).

$$N = \frac{E_{FV}}{P_N} \quad (3.8)$$

Uma vez que a associação dos módulos fotovoltaicos será mista (como é explicada seguidamente), pois se consegue maiores valores de corrente e também de tensão, as *strings* em paralelo têm de ter o mesmo número de painéis, obrigatoriamente com as mesmas características. O arredondamento para número de painéis obtidos é feito sempre para maior, para que as necessidade sejam totalmente cumpridas [47]. Sendo assim, o número de módulos necessário em cada furo foi arredondado para maior, assim como mostra a Tabela 20. Uma vez configuração de ligação dos módulos exige que as *strings* possuam o mesmo número de módulos, foi necessário o acréscimo de mais um módulo no valor originalmente obtido no furo 2 e 3.

Tabela 20- Número de módulos necessário no furo 1, 2 e 3.

Designação	Nº de módulos	Nº de módulos a instalar (W_p)
Furo 1	15,917 \approx 16	16
Furo 2	12,095 \approx 13	14
Furo 3	11,424 \approx 12	12

Sendo assim a energia fotovoltaica final instalada em cada um dos furos será superior a potência obtida através dos cálculos. Nesse cenário o furo 1 terá a potência fotovoltaica instalada de 5,280 kW_p , o furo 2 de 4,620 kW_p e no furo 3 a potência instalada será de 3,960 kW_p . Conhecido a potência total a ser instalada em cada furo, observou-se que a potência do furo 1 e 3 não atingiu a potência nominal requerida pelo conjunto motobomba anteriormente. Um ligeiro aumento no número de módulos (2), seria suficiente para aumentar a potência total instalada no furo 1 e 3, atingindo assim a potência nominal do motor. No entanto uma matriz fotovoltaica raramente produz a energia de pico instalada, e com o objetivo de diminuir ao máximo o custo do subsistema, foi analisado outras duas bombas mais acessíveis e capazes de satisfazerem as necessidades dos furos de acordo com as potências fotovoltaicas a ser instalada. A Tabela 21 contém os dados técnicos dos conjuntos motobombas anteriormente escolhidos (SP 9-23 e SP 5A-38) e dos novos conjuntos (SP 9-21 e SP 5A-33). Conhecendo as características dos módulos fotovoltaicos e a configuração de ligação em cada furo, a seguir descritos, é possível adiantar que no furo 1 seria necessário mais do que 16 módulos para que a bomba trabalhe na sua tensão nominal de 380/400/415 V, visto isto, o conjunto motobomba SP 9-21 conseguiu bombear a mesma quantidade de água ($9 m^3/h$) e se encontra dentro da faixa ($3 \times 220/230$ V) de tensão produzida pela matriz fotovoltaica, bem como a tensão (14,2/14,6 A) e com um potência reduzida de 4 kW, menor que a potência instalada no furo, assim como o preço do conjunto. No cenário do furo 3, o novo modelo escolhido SP 5A-33, possui a mesma tensão ($3 \times 220/230$ V) de funcionamento que o antigo modelo escolhido (SP 5A-33), já a corrente é menor 14,2/14,6 A, assim como a potência de 3 kW e o preço do conjunto. Os novos conjunto motobomba encontram-se enquadrados no valor da potência instalada em cada furo assim como o conjunto escolhido para o furo 2.

O cenário permite que as bombas funcionem na sua potência nominal, mesmo que a matriz fotovoltaica não produza a potência pico da instalação.

Tabela 21 - Dados técnicos dos conjuntos motobombas do furo 1, 2 e 3.

Designação	Marca	Modelo	Potência (kW)	Tensão V	Corrente (A)	Volume (m ³ /h)	Preço (€)
Furo 1	Grundfos	SP 9-23	5.5	380/400/415	13/13,4	9	3279
		SP 9-21	4	$\sqrt{3} \times 220/230$	17,4/17,6	9	2786
Furo 2		SP 7-27	4	$\sqrt{3} \times 220/230$	17,4/17,6	7	2578
Furo 3		SP 5A-38	4	$\sqrt{3} \times 220/230$	17,4/17,6	5	3121
		SP 5A-33	3	$\sqrt{3} \times 220/230$	14,2/14,6	5	1736

3.1.5. Dimensionamento do inversor DC-AC, conversor de frequência AC-AC, cabos elétricos de ligação e dispositivos de segurança

Para cada sistema fotovoltaico será utilizado um inversor central, ou seja, todos os módulos de cada sistema serão conectados a um único inversor. Cada inversor será ligado a um CF AC-AC. No lado DC será instalado um interruptor DC e no lado AC um disjuntor AC.

3.1.5.1. Inversor DC-AC

A atenção a qual se deve ter utilizando um inversor central, é a utilização de módulos com iguais características elétricas (tensão, corrente e potência). Isto porque, a corrente a entrada do inversor são valores únicos e o ponto máximo de potência de funcionamento do mesmo é determinado por esses valores, quando módulos com características diferentes são conectados ao inversor a sua eficiência é reduzida, uma vez que o equipamento não é capaz de diferenciar os pontos de potência máxima das fileiras de módulos [48].

3.1.5.1.1. Cálculo de número de módulos por fileira

Para realizar o cálculo do número de módulos por fileira, é necessário conhecer as características do inversor para a realização desses cálculos, sendo assim conhecendo a potência total do SFV a ser instalado em cada furo, é possível escolher o inversor que

garante a satisfação energética do sistema. Um inversor de corrente suporta até 20% de sobrecargas, em sistemas autônomos suportam até 100% da carga, porem dificilmente um inversor funciona na sua potência máxima [47]. Para ambos os furos o inversor escolhido foi o Sunny Tripower 5.0 com 5.0 kW de potência nominal, todas as demais características encontram-se na tabela 22.

Tabela 22- Dados Técnicos do inversor *Sunny Tripower*.

Marca	Modelo	Dados técnicos		
<i>Sunny Boy</i>	<i>Sunny Tripower 5.0</i>	Entrada DC		
		Potência Nominal	9000	W
		Tensão Nominal	850	V
		Intervalo de Tensão MPP	215-800	V
		Tensão atribuída na entrada	580	V
		Tensão mínima/Tensão inicial	125	V
		Corrente máxima de entrada A/B	12	A
		Corrente máxima de entrada por string A/B	18	A
		Número de MPPT/ string MPPT	2/A:1;B:1	
		Saída AC		
		Potência Nominal	500	W
		Tensão Nominal	220/380	V
		Corrente Máxima	3 x 7,6	A
		Eficiência do Inversor Máx/CEC	98,2/97,4	%

3.1.5.1.1.1.Cálculo da Tensão dos Módulos para Diferentes Condições de Funcionamento (10 e 70°C)

É necessário limitar o número de módulos e o valor máximo de tensão que resulta da associação dos módulos para evitar possíveis disparos do inversor, o número de módulos é determinado pelo valor da tensão DC máxima permitida para interligar os módulos FV em série e também pelo valor da tensão máxima à entrada do inversor . Primeiramente é preciso verificar a tensão dos módulos para diferentes condições de temperatura, no

Inverno quando ocorrem as temperaturas mais baixas e no Verão quando ocorrem as temperaturas mais altas. A temperatura na qual o sistema funciona determina o valor de tensão que circula nas fileiras, uma vez que a variação da tensão do módulo é influenciada pela variação da temperatura (ΔV). Para o cálculo é utilizado a temperatura mínima (T_{min}) -10°C e a temperatura máxima ($T_{máx}$) 70°C a qual o sistema pode funcionar. Geralmente a tensão máxima que circula na fileira ocorre no valor mínimo de temperatura e a tensão mínima corresponde ao ponto de potência máxima (V_{MPP}) da fileira [47]. Devido a localização geográfica do local de projeto, Santa Cruz não registra temperaturas negativas, as temperaturas mais baixas são registadas nos meses de Janeiro, Fevereiro, Novembro e Dezembro, com valores mínimos na ordem de 19 a 25°C , sendo assim para o cálculo da tensão do curto circuito do módulo a temperatura mínima de funcionamento será mudada para 10°C . Primeiramente será calculado a tensão de circuito aberto do módulo na temperatura mínima de funcionamento $V_{OC}(\text{modulo a } 10^{\circ}\text{C})$ (Equação 3.10) e a tensão no ponto de máxima potência na temperatura máxima de funcionamento $V_{MPP}(\text{modulo a } 70^{\circ}\text{C})$ (Equação (3.11)) [47]. Para aplicar as Equações (3.10) e (3.11) é necessário conhecer os valores do V_{OC} , ΔV e V_{MPP} do módulo, esses valores são obtidos em Condições de Teste Padrão (STC) realizadas a 25°C , a quais os módulos FV são sujeitas, os valores para cada uma das incógnitas são $V_{OC(STC)} = 45,7\text{ V}$, $\Delta V\% = -0,27\%/^{\circ}\text{C}$ e $V_{MPP(STC)} = 37,1\text{ V}$.

$$V_{OC}(\text{modulo a } 10^{\circ}\text{C}) = \left[1 - \left(\frac{(25 - T_{min}) * \Delta V(\%)}{100} \right) \right] * V_{OC(STC)} \quad (3.10)$$

$$V_{MPP}(\text{modulo a } 70^{\circ}\text{C}) = \left[1 - \left(\frac{(25 - T_{máx}) * \Delta V(\%)}{100} \right) \right] * V_{MPP(STC)} \quad (3.11)$$

Uma vez que o módulo fotovoltaico é igual em cada um dos furos, o valor obtido aplicando a equação 5.2 e 5.3 é igual para cada um dos três sistemas fotovoltaicos, $V_{OC}(\text{modulo } 10^{\circ}\text{C}) = 47,55\text{ V}$ e $V_{MPP}(\text{modulo a } 70^{\circ}\text{C}) = 32,59\text{ V}$. O $V_{OC}(\text{modulo } 10^{\circ}\text{C})$ será necessário para o dimensionamento do interruptor DC necessário no barramento principal DC de cada furo.

A tensão que circula nos terminais da fileira deve respeitar o limite mínimo e o limite máximo de tensão do inversor na qual ele trabalha, para que o mesmo funcione no seu

ponto máximo de extração de energia (V_{MPP}). A equação (3.12) e (3.13) serve para determinar o número mínimo e máximo de módulos por fileira em série, é determinada pela tensão mínima $V_{min} = 125 V$ e pela tensão máxima $V_{máx} = 850 V$ do inversor.

$$N_{máx} = \frac{V_{máx} (inversor)}{V_{OC} (modulo a 10^{\circ}C)} \quad (3.12)$$

$$N_{mín} = \frac{V_{mín} (inversor)}{V_{MPP} (modulo a 70^{\circ}C)} \quad (3.13)$$

Aplicando as duas equações os resultados obtidos foram $N_{máx} = 17,87$ e $N_{mín} = 3,83$, para garantir que o sistema funcione nas melhores condições, o número mínimo de módulos em serie de cada fileira não deve ser inferior a 3 e nem superior a 14 para ambos os furos. A tensão nos terminais de cada fileira deve-se encontrar dentro da gama de variação da tensão de entrada do inversor, para a qual este tem capacidade de extrair a potência máxima da fileira.

Depois de conhecer o número máximo e mínimo de módulos permitido por fileira na qual irão ser ligados aos inversores, é necessário conhecer o número de fileiras em paralelo que o inversor suporta, para isso será aplicada a Equação (3.14). O número de fileiras suportado pelo inversor é determinado pelo corrente máxima do inversor $I_{máx} = 12 A$ e pela corrente máxima que circula no módulo $I_{MPP} = 8,80 A$, novamente esses valores são iguais para cada um dos sistemas fotovoltaicos.

$$N_{fileira} = \frac{I_{máx} (inversor)}{I_{MPP} (módulo)} \quad (3.14)$$

O número de fileiras em paralelo que o sistema pode ter é de $1,5 \approx 2$.

3.1.5.1. Conversor de Frequência

O dimensionamento do conversor é baseado na corrente e na potência nominal do motor. Para que o CF alcance a potência nominal do motor, a corrente nominal do conversor deve ser superior a corrente nominal do motor, assim como a potência nominal do

conversor deve ser superior a potência nominal do motor [42]. O CF escolhido para cada circuito foi o ACS355 da ABB.

Para a ligação elétrica do furo 1 e 2 o CF escolhido foi ACS355-03E-24A4-2 de 5,5 kW e 24,4 A de potência e corrente respectivamente, houve um sobredimensionamento do CF, para que o mesmo possa alcançar a potência nominal do motor. As demais características correspondentes ao inversor estão na Tabela 23 onde: I_{1N} 41 A, corresponde a entrada eficaz DC, esse valor é utilizado para o dimensionamento de cabos e fusíveis; I_{2N} de 24,4 A corresponde a corrente contínua eficaz de saída, permite 50% de sobrecarga durante 1 min em cada 10 min; $I_{2,1 \text{ min}/10 \text{ min}}$ de 36,6 A corresponde a corrente máxima de saída permitida durante 1 minuto em cada 10 minutos; I_{2max} de 42,7 A corresponde a corrente máxima de saída disponível durante 2 segundos no arranque, ou enquanto a temperatura do conversor o permitir e P_N de 5,5 kW corresponde a potência nominal do motor. A potência máxima permitida no veio do motor, é limitada pela condição $1,5 * P_N$, em casos em que esse limite é excedido, o binário e a corrente do motor são automaticamente limitados, para evitar sobrecarga na ponte de entrada do CF [42]. Para os dois circuitos, não haverá sobrecargas, visto que a potência fornecida pelos CF se encontram dentro dos limites de 6 kW suportado pelos motores.

Tabela 23 - Dados técnicos do conversor de frequência ACS355-03E-24A4-2 para o ligação elétrica do furo 1 e 2.

Equipamento	Marca	Modelo	Dados Técnicos			
Conversor de Frequência	ABB	ACS355-03E-24A4-2	Tensão de alimentação trifásica, de 200 a 240 V			
			Entrada			
			DC eficaz	I_{1N}	41	A
			Saída			
			DC eficaz	I_{2N}	24,4	A
			Corrente máxima	$I_{2,1 \text{ min}/10 \text{ min}}$	36,6	A
			Corrente máxima	I_{2max}	42,7	A
			Potência típica do motor	P_N	5,5	kW

Para a ligação elétrica do furo 3, o CF escolhido foi o ACS355-03E-17A6-2 de 4 kW, a entrada eficaz DC é 25 A, a corrente contínua eficaz de saída é de 17,6 A e a corrente

máxima de saída disponível durante 2 segundos no arranque, ou enquanto a temperatura do conversor o permitir é de 30,8 A, como é possível ver na Tabela 24. O conversor escolhido se encontra dentro do limite de potência permitida no motor, que é de 4,5 kW.

Tabela 24 - Dados técnicos do conversor de frequência ACS355-03E-17A6-2 para o ligação elétrica do furo 3.

Equipamento	Marca	Modelo	Dados Técnicos			
Conversor de frequência	ABB	ACS355-03E-17A6-2	Tensão de alimentação trifásica, de 200 a 240 V			
			Entrada			
			DC eficaz	I_{1N}	25	A
			Saída			
			DC eficaz	I_{2N}	17,6	A
			Corrente máxima	$I_{2,1 \text{ min}/10 \text{ min}}$	26,4	A
			Corrente máxima	I_{2max}	30,8	A
			Potência típica do motor	P_N	4	kW

3.1.5.2. Dispositivos de segurança

Os dispositivos de proteção do sistema, tem como objetivo proteger cada equipamento que compõe a instalação elétrica, contra os diferentes defeitos que podem ocorrer no sistema, como a sobreintensidade e o curto-circuito. A mesma ocorre quando há sobrecargas no sistema, ou seja, a corrente elétrica de serviço do sistema ultrapassa o valor máximo esperado nos condutores. Para cumprir a norma EN 60204-1, Segurança de Maquinaria, das diretivas da União Europeia, o circuito elétrico de cada furo terá um interruptor de corte DC e um disjuntor AC [42].

3.1.5.2.1. Interruptor DC

O interruptor DC é um aparelho de corte acessível instalado entre o gerador FV e o CF, serve para separar o CF do gerador fotovoltaico em caso de avarias ou manutenções. O mesmo deve ser bipolar, para isolar o circuito positivo do negativo, deve possuir também um poder de corte alto, para no caso de abertura o corte ser feito de forma segura. O

interruptor DC deve cumprir a seguinte condição $I_{GDC} \geq 1,25 * I_{SC}$ e $V \geq V_{OC} \text{ (modulo a } 10^{\circ}C)$, em que I_{GDC} é a corrente geral DC do interruptor em ampère, I_{SC} é a corrente de curto circuito do modulo em STC, V é a tensão do interruptor e $V_{OC} \text{ (modulo a } 10^{\circ}C)$ é a tensão máxima em circuito aberto do gerador fotovoltaico à temperatura de $10^{\circ}C$. Uma vez que o sistema fotovoltaico de cada furo é configurado por duas fileiras em série, é necessário multiplicar a corrente de curto circuito por 2: $I_{GDC} \geq 1,25 * 2 * I_{SC}$. Sendo assim o interruptor DC a ser instalado no sistema fotovoltaico de cada furo terá de possuir uma corrente superior ou igual a 23,45 A. Isto acontece porque os furos possuem módulos com as mesmas características, logo a corrente do interruptor DC terá a mesma corrente. O interruptor encontrado no mercado que mais se aproxima desse valor possui uma corrente de 32 A. Os interruptores DC escolhidos para cada um dos furos são compostos por dois polos, para a fase e o neutro. O interruptor possui uma corrente nominal ou corrente geral de 32 A, a tensão nominal é de 550 V e a capacidade nominal de curto-circuito (I_{cn}) de 6 kA.

3.1.5.2.2. Disjuntor AC

O disjuntor AC é um dispositivo completo porque para além de ter proteção diferencial contra as correntes de fuga, possui também proteção magneto térmica, ou seja, está protegido contra sobrecargas e curtos-circuitos. Ao contrário do interruptor que possui somente proteção diferencial contra as correntes de fuga. Ao escolher o disjuntor, é necessário conhecer a corrente de funcionamento do motor (I_B), a corrente nominal que circula no circuito (I_Z), para determinar a corrente do disjuntor (I_N) que o dispositivo é capaz de interromper sem se avariar. Sendo assim será aplicada a condição $I_B \leq I_N \leq I_Z$ para determinar o calibre do disjuntor de proteção [47]. Como já tido anteriormente, o CF deve ter a corrente superior a corrente nominal do motor, para que o mesmo alcance a potência nominal do motor. Sendo assim será considerada a corrente nominal do CF como sendo a corrente nominal do motor, para que o dispositivo não desarme. Todos os motores possuem uma corrente de arranque acima da corrente de funcionamento, nesse caso é necessário o uso de disjuntores com curva C, pois são capazes de suportar correntes 5 a 10 vezes maiores que a sua corrente nominal.

Os disjuntores AC escolhidos possuem três polos para ligação das fases do circuito, a tensão de isolamento é de 500 V, a corrente de utilização é de 240/400 V para o interruptor selecionado [49].

3.1.5.3. Cabos elétricos

Para a instalação elétrica de um SF, apenas devem ser usados cabos que cumpram os requisitos para este tipo de aplicação. É necessário levar em conta também as distâncias entre os componentes do sistema, para evitar queda de tensões e diminuição na eficiência do sistema. É também importante, fazer a distinção entre os cabos dos módulos, o cabo principal DC e o cabo do ramal AC [47].

3.1.5.4. Cabos DC

Os cabos dos módulos ou cabos de *strings* DC, são os condutores que estabelecem a ligação elétrica entre os módulos individuais de um gerador solar e a caixa de junção do gerador. Estes cabos são geralmente aplicados no exterior. Para garantir a proteção contra a ocorrência de defeitos de terra, bem como, curto-circuitos, os condutores positivos e negativos não podem ser colocados lado a lado no mesmo cabo [47]. Na figura 5 é possível ver os cabos referente as *strings* e ao cabo DC principal.

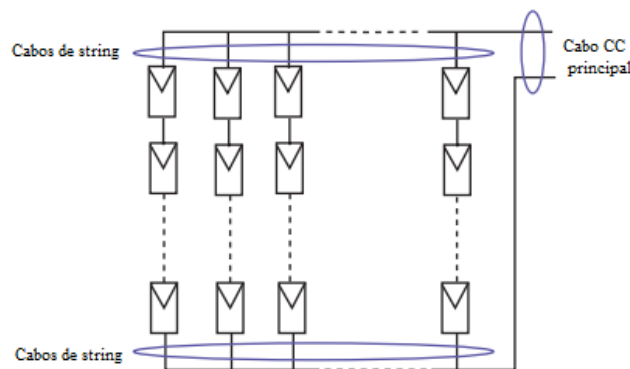


Figura 5- Esquema de ligação dos cabos de ligação das strings e o cabo DC principal. Fonte: [47]. Adaptado.

A secção utilizada nas cablagem das fileiras dos módulos é obtida, aplicando a Equação (3.12):

$$S_{fileira} = \frac{2 * L_{fileira} * I_{fileira}}{\Delta V * V_{MPP} * \sigma} \quad (3.12)$$

Onde $S_{fileira}$ é a secção do cabo de fileira DC em mm^2 , $L_{fileira}$ é o comprimento da cablagem da string em m , I_{1N} corresponde a DC de entrada eficaz, V_{MPP} tensão de saída da string em V , ΔV corresponde a queda de tensão (máximo admissível 1%) e σ representa a condutividade do condutor (alumínio $34 \Omega/mm^2$). Para determinar as perdas em W , que ocorrem nos cabos das fileiras, de acordo com a secção da mesma, aplica-se a Equação (3.13).

$$Perdas = \frac{2 * L_{fileira} * I_{fileira}^2}{S_{fileira} * \sigma} \quad (3.13)$$

O cabo principal DC estabelece a ligação entre a caixa de junção das strings do módulo FV e o dispositivo de controle. Para as caixas de junções localizadas no exterior, os cabos devem ser entubados, uma vez que não são resistentes aos raios ultravioletas. A norma europeia IEC 60364-7-712 estabelece que o cabo principal DC deverá suportar até 1,25 vezes da I_{sc} do módulo sob as condições STC [47]. Sendo assim, a secção do cabo precisar respeitar a condição imposta pela condição $I_{m\acute{a}x} \geq 1,25 * I_{sc}$. A secção do cabo principal DC é dada pela Equação (3.15):

$$S_{DC} = \frac{2 * N * L_{CC} * I_n^2}{(FP * P_{gerador} - P) * \sigma} \quad (3.15)$$

Onde S_{DC} é secção do cabo principal DC em mm^2 , L_{CC} é o comprimento do cabo principal em m , N é o número de fileiras, I_n é a corrente de nominal no cabo em A , FP é o factor de perdas na linha (admissível na ordem de 1 a 2 %), $P_{gerador}$ é o valor da potência do SFV, P corresponde as perdas que ocorrem no cabo DC e σ é a condutividade do condutor (alumínio $34 \Omega/mm^2$). As perdas nos cabos é determinada pela Equação (3.16).

$$Perdas = \frac{2 * L_{DC} * I_n^2}{S_{DC} * \sigma} \quad (3.16)$$

3.1.5.5. Cabos AC

O CF é capaz de proteger a si mesmo, aos cabos de entrada e do motor contra sobrecarga térmica, também protege o motor e o cabo do motor em situações de curto-circuito, isto, se os cabos estiverem dimensionados de acordo com a I_{1N} do conversor [42]. O cabo de ligação de AC liga o dispositivo de controle à fonte recetora. O cabo que liga o conversor

de frequência ao motor é obtida aplicando a Equação (3.17), e as perdas nos cabos podem ser obtidas aplicando a Equação (3.18).

$$S_{AC} = \frac{\sqrt{3} * L_{AC} * I_{n\ CF} * \cos \varphi}{\Delta V * V_N * \sigma} \quad (3.17)$$

Onde S_{CA} é secção do cabo principal AC em mm^2 , L_{CA} é o comprimento do cabo AC em m, $I_{n\ CF}$ é a corrente nominal do conversor de frequência em A, $\cos \varphi$ é o fator de potência, ΔV é a queda de tensão (máximo admissível 3%), V_n é a tensão nominal do motor e σ é a condutividade do condutor (cobre $56 \Omega/mm^2$).

$$Perdas = \frac{2 * N * L_{AC} * I_{n\ CF} * \cos \varphi}{S_{AC} * \sigma} \quad (3.18)$$

O CF usado no circuito elétrico de cada furo, tem por objetivo controlar um motor de indução trifásico, caracterizado com um equipamento de carga não linear. A carga não linear altera a forma de onda da V e da I, pois introduzem harmónicos nas quais contribuem para a degradação da qualidade da energia elétrica. Nesta situação, destaca-se um mau funcionamento de equipamentos, baixo FP, distorção na forma de onda da tensão e/ou corrente, aquecimento de cabos, dentre outros .

A questão mais pertinente na seleção e no dimensionamento dos condutores em sistemas fotovoltaicos autónomos são as perdas e as quedas de tensão nos cabos de ligações [47]. Neste contexto, devido a natureza do equipamento, a secção dos cabos DC e AC do circuito elétrico de cada furo, serão escolhidos recorrendo a Tabela do manual do CF da ABB, para garantir o melhor funcionamento do sistema. A entrada de potência, os cabos do motor devem ser capazes de transportar a corrente nominal fornecido pelo CF. A secção transversal do cabo de proteção PE (terra) deve ser igual à do condutor de fase [42], como mostra a Figura 6.



Figura 6-Cabo blindado trifásico, três condutores fase e um terra para alimentação do motor AC.

Fonte: [42].

Para o circuito elétrico do furo 1 e 2, será necessário instalar cabos com 10 mm^2 de secção em todo o circuito, já para o furo 3 os cabos terão 6 mm^2 de secção.

No circuito DC, para diferenciar os cabos do pólo positivo e do negativo que saem da matriz fotovoltaica e liga ao CF, foi escolhido para o polo positivo o condutor RV-K Vermelho 0,6/1 kV e para o polo negativo o condutor PV ZZ-F Solar Preto 0,6/1 kV, de acordo com a secção requerida em cada furo. Os condutores possuem um valor eficaz da tensão (V_{RMS}) entre condutores fase e terra e fase-fase de 0,6/1 kV, a temperatura de operação normal do condutor encontra-se entre -40 e 90°C e a temperatura máxima que o cabo suporta em uma situação de curto-circuito por no máximo 5 segundos é de 250°C [50], como é possível ver na Tabela 25.

Tabela 25 - Características dos cabos DC escolhidos para os circuitos elétricos dos furos 1, 2 e 3. Fonte: [50].

Designação	Cabos DC				
	Referência	Ø interno (mm)	V_{RMS} (kV)	$T_{serviço}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{Máx \text{ curto circuito}}$ ($^\circ\text{C}$)
Furo 1	PV ZZ-F Solar Preto RV-K Vermelho	10	0,6/1	-40/120	250°C (Máx. 5s)
Furo 2	PV ZZ-F Solar Preto RV-K Vermelho	10	0,6/1	-40/120	250°C (Máx. 5s)
Furo 3	PV ZZ-F Solar Preto RV-K Vermelho	6	0,6/1	-40/120	250°C (Máx. 5s)

De acordo com a Tabela 26, os cabos BELDEN com 10 mm^2 de secção escolhidos para o circuito AC dos furos 1 e 2 suportam correntes máximas de 55 A cada condutor, ou seja, suporta a corrente de alimentação dos motores no arranque. A sua corrente eficaz de funcionamento é de 600 V e a temperatura de operação é de -40 a 90°C . Já o cabo BELDEN escolhido para o furo 3 com 6 mm^2 , os condutores suportam correntes máximas de 40 A, assim como os cabos de 10 mm^2 a corrente eficaz e a temperatura de operação é de 600 V e de -40 a 90°C e suporta a corrente de alimentação do motor no arranque.

Tabela 26- Características dos cabos AC escolhidos para o circuito elétrico do furo 1, 2 e 3.

Fonte: [51] [52].

Designação	Cabos AC				
	Ø interno (mm)	Ø externo (mm)	$I_{m\acute{a}x}$ por condutor (A)	V_{RMS} (V)	$T_{operac\tilde{o}a}$ (°C)
Furo 1	4x10	4x23,61	55	600	-40/90
Furo 2	4x10	4x23,61	55	600	-40/90
Furo 3	4x6	4x17,53	40	600	-40/90

Os cabos usados, são recomendados pelo fabricante, pois as tensões de saída do CF são sinais pulsados com alto conteúdo harmónico.

3.1.6. Diagrama Unifilar

O Diagrama unifilar representa um sistema elétrico de forma simplificada, identificando os pontos de conexão dos dispositivos, o número de condutores e seus trajetos tudo num único fio. Na figura 7 é possível ver o diagrama unifilar referentes aos circuitos elétricos dos furos 1, 2 e 3. O diagrama representa a ligação elétrica desde a dos módulos até a alimentação do motor trifásico, bem como as especificações dos dispositivos que fazem parte do circuito, como os módulos, os cabos, os conversores e os disjuntores.

O esquema de ligação à Terra, é um ponto fundamental a ter em conta na ligação elétrica. Isto garante que qualquer equipamento que possua o fio terra seja interligado ao sistema de aterramento, o que minimiza os efeitos destrutivos de descargas elétricas (e eletrostáticas) nos equipamentos elétricos. Por isso, o PF, o CF e o motor estão ligados ao sistema de aterramento, como mostra o esquema unifilar. Uma vez que os cabos de ligação terra do circuito elétrico do furo 1 e 2 possuem uma secção de 10 mm^2 , foi então adotado a mesma secção para o circuito elétrico do furo 3.

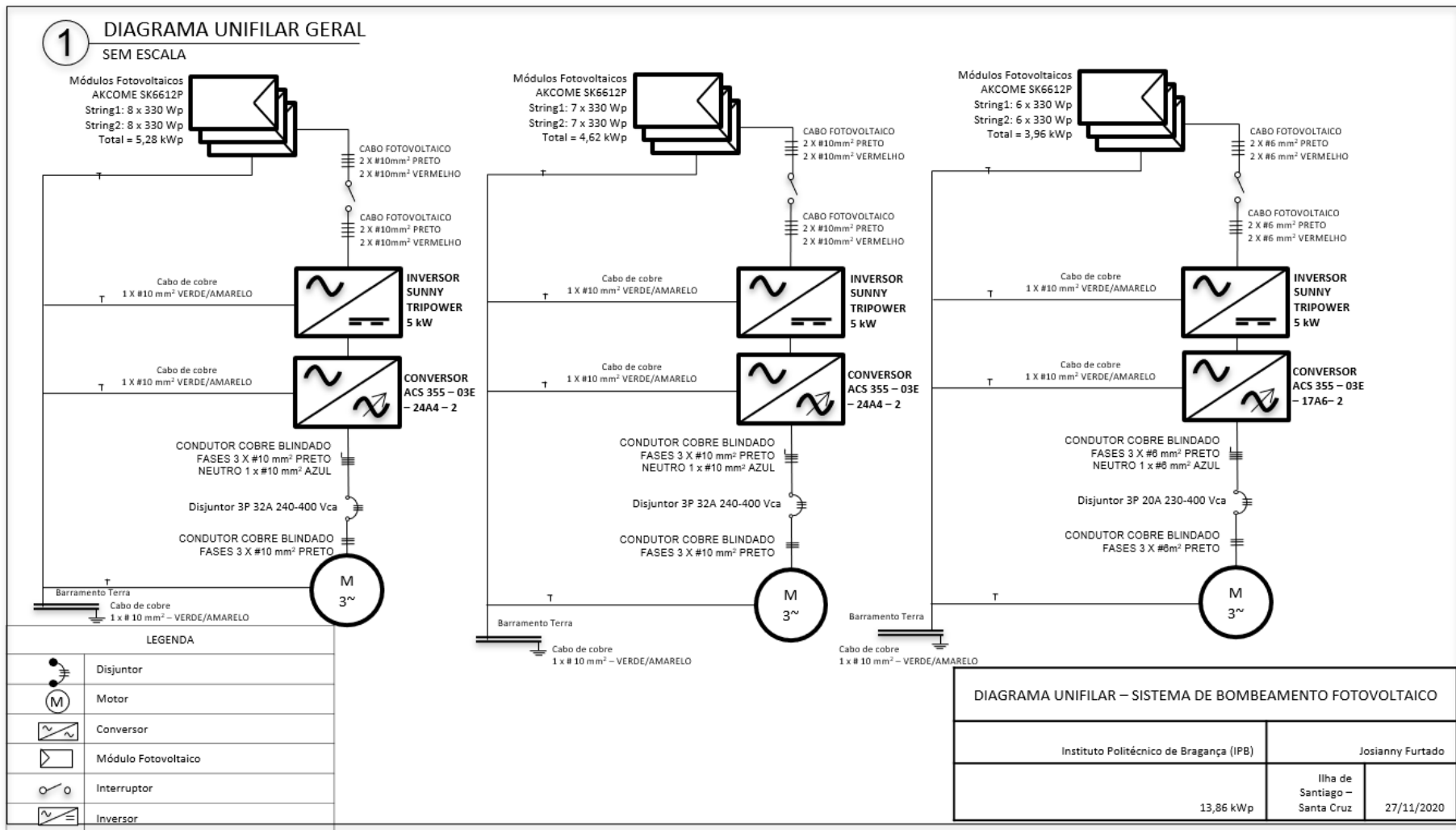


Figura 7 - Diagrama unifilar dos furos 1, 2 e 3.

3.2. Dimensionamento do Furo de captação

Os furos de captações são obras pontuais que têm o objetivo de captar a água subterrânea e fornecer a superfície seja por exemplo: para abastecimento populacional, industrial, agrícola ou para rebaixar o nível piezométrico em obras de engenharia. A construção de um furo de captação de água subterrânea pode dividir-se em diferentes fases. Na primeira fase, fase de pesquisa, pretende-se definir o local mais produtivo realizando estudos hidrogeológicos e geofísicos para obter o máximo de informações do local. Na segunda fase, designada por dimensionamento da captação, onde o objetivo é definir o método de furação a ser utilizado, os diâmetros e a profundidade da perfuração e os materiais necessários, essa etapa é definida pelos resultados obtidos na pesquisa pois determina o investimento necessário para realizar a captação. A fase de execução, terceira fase, consiste na fase de perfuração do furo, a instalação do revestimento do furo e isolamento necessário para evitar eventuais lamas no fluxo da água e por último a fase de exploração e manutenção, onde são realizados ensaios de caudal que permite calcular os parâmetros hidráulicos do aquífero que permite dimensionar o conjunto hidráulico.

Para construir um furo de captação de água subterrânea diferentes materiais são utilizados, no fundo do furo é colocado uma tampa denominado tampa fêmea que serve como base para o tubo de revestimento mencionado anteriormente, este serve para prevenir o colapso das paredes de perfuração e proteger o equipamento de bombagem, o maciço filtrante composto pelo areião, reveste o tubo de revestimento e serve para consolidar a parede do furo evitando que os detritos do mesmo entrem no circuito hidráulico, em alguns aquíferos poucos consolidados é necessário que o revestimento com maciço filtrante utilizando seja feita em toda a profundidade, visto que à medida que o tempo passa, aumenta a probabilidade de as paredes do furo colapsarem. Os materiais isolantes utilizados podem ser também filtrantes como, a cimentação, ou compactonite⁵ para isolar o tubo de revestimento. O tubo filtro, é instalado aonde há maior afluxo de água, uma vez que ele permite a entrada da água no interior da tubagem para ser bombeada para superfície, a água bombeada é conduzida pelo tubo de adução para fora do furo, podendo

⁵ Compactonite- nome comercial para bentonite uma argila de alta expansividade em pellets.

ser reservada em um reservatório caso exista, para que isso aconteça o tubo de adução no interior do furo é unida a bomba através do canhão bomba, o mesmo será ligado a um tubo de adução na superfície através de um Joelho de 90°e para unir as tubagens é utilizado a união de acordo o comprimento do mesmo. O centrador também colocado no tubo de adução é utilizado para dar estabilidade ao cabo elétrico que alimenta a bomba e a corda utilizada na instalação da tubagem dentro do furo, já os centralizadores permitem alinhar o eixo do tubo de revestimento com o eixo do furo criando também um espaço regular para os matérias isolantes. Por fim, para proteger o furo de corpos externos é instalada uma outra tampa a saída do mesmo [53]. Na figura 8 é possível ver o esquema em corte de um furo de captação de água subterrânea.

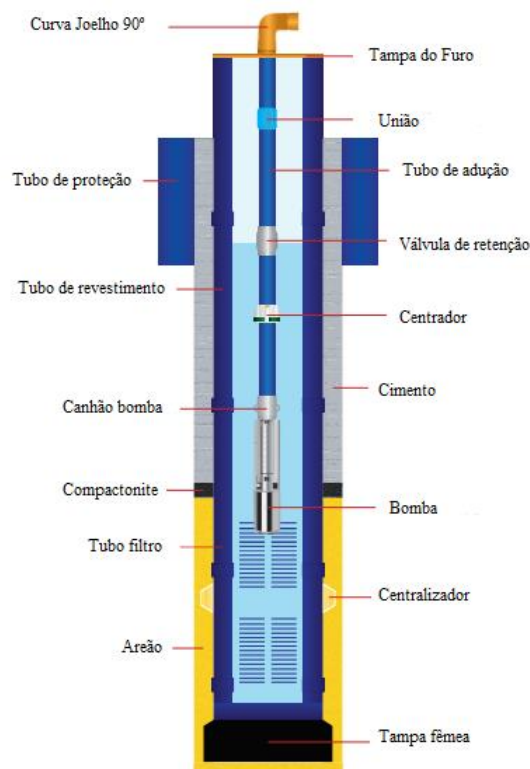


Figura 8-Componentes de um furo de captação de água subterrânea. Fonte: [53].

O furo deve ser dimensionado antes de ser realizada a captação, visto que é necessário definir a escolha do tipo de construção que define o orçamento, o mesmo pode ser diminuído, perfurando o limite necessário, não ultrapassar o diâmetro requerido e utilizar matérias menos dispendiosos. O caudal de exploração e o tipo de aquífero, são os principais condicionantes no dimensionamento de furos de captação de água subterrânea.

O caudal é determinado de acordo com a sua finalidade, que pode ser para consumo humano ou animal ou para fins agrícolas.

O tipo de aquífero influencia bastante no tipo e na quantidade de equipamentos que devem ser utilizados para garantir a estabilidade do furo. A estrutura do furo para captação de água em aquíferos fraturados e cárnicos é menos complexo, precisa somente ser revestida e cimentada na secção superficial da captação de forma a prevenir a entrada de água superficial, já o restante do furo desde que haja estabilidade das paredes da perfuração pode ficar sem revestimento, são designados como *open hole* ou buraco aberto, como mostra a figura 9.

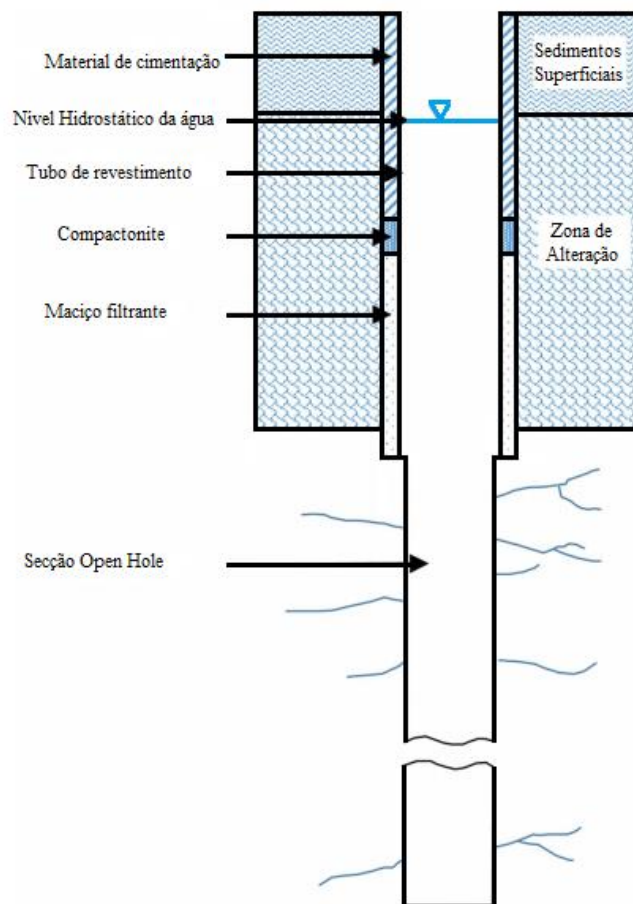


Figura 9-Componentes de um furo de captação *open hole*. Fonte: [53].

Já a estrutura de furos para captação de água em aquíferos porosos, geralmente necessitam de um revestimento total, instalando tubos ralos em pontos com maior potencial de afluxo de água, teoricamente os aquíferos possuem um estrutura consolidada, por isso, não necessita de tubo ralo, porém para reduzir o risco de entrada de partículas de areia na

construção do furo, influenciando no orçamento do projeto. Sendo assim foram consideradas três diferentes cenários possíveis a qual podem ocorrer, em um primeiro cenário furos com o revestimento *open hole*, no segundo cenário um furo que não necessita de revestimento de maciço filtrante em toda a sua profundidade, na qual será denominada furo “Sem Revestimento Maciço Filtrante” e no terceiro e último cenário um furo que necessita de revestimento de revestimento maciço filtrante em toda a sua profundidade denominado de furo “Com Revestimento de Maciço Filtrante”.

3.2.1.1. Furo *Open Hole*

Na primeira parte do dimensionamento foi feita a estimativa da quantidade de matérias que cada um dos furos necessita de acordo com as suas características e algumas regras a quais devem ser respeitadas. Os materiais mais utilizados para o revestimento do furo destaca-se o PVC-U (policloreto de vinilo não plastificado), o aço norma DIN 2458⁶ e o aço inoxidável, entre esses materiais os tubos de PVC-U são os mais utilizados na construção de captações de água subterrânea [53]. A maioria dos componentes escolhidos no dimensionamento são em PVC-U, alguns acessórios são em aço inox da empresa portuguesa “Tubofuro”.

As Tabelas 28, 29 e 30 mostram a quantidade de materiais utilizados nos furos 1, 2 e 3 classificados como *open hole*. O revestimento nestes furos deve atingir, preferencialmente, a zona abaixo de colocação do grupo submersível evitando o posicionamento do mesmo na secção *open hole*. O tamanho do areão é separado por classes granulométricas pré-definidas, adequadas para as diferentes granulometrias dos aquíferos, o tamanho é selecionado de forma a conseguir a estabilização das formações aquíferas. A espessura eficaz do maciço filtrante é regra geral de 3”, podendo nunca ser inferior a 2,5”, o uso de areão demasiado espessos dificultam o desenvolvimento da captação e demasiados finos

⁶ DIN 2458- abreviação de “Deutsches Institut für Normung”, é um comitê de normas da indústria alemã que garante um alto padrão de qualidade na fabricação de produtos e de equipamentos, proporcionando segurança durante todo o processo. Os tubos de aço DIN 2458 são fornecidos na seção circular, laminados direto de uma máquina formadora.

podem não rodear de forma contínua os tubos filtro, o que pode originar problemas de arrasto de partículas finas [53]. Sendo assim o revestimento de cada um dos furos será feita com um excesso apenas de 1 m da profundidade a qual o conjunto submerso será posicionado para garantir que o conjunto não seja posicionado no espaço *open hole* garantindo um orçamento mais baixo possível. A classe granulométrica do areão foi escolhida respeitando a regra geral, assegurando que o mesmo circunda os tubos ralo de forma contínua. Realçando que a espessura da ranhura do tubo filtro foi escolhida de forma a evitar a entrada dos distritos do maciço filtrante no interior da tubagem. O furo 1 com 100 m será revestido até 64 m, o furo 2 com 150 m será revestido até 87 m e o furo 3 com 200 m será revestido até 115 m, a maior parte do revestimento será feito com tubo georoscado liso e uma menor parte por tubo georoscado estriado filtro, este permite o afluxo da água para o interior da tubagem de modo a ser bombeada para a superfície. As Tabelas 27, 28 e 29, contém a descrição de todos os outros materiais necessários como: a união, válvula de retenção, canhão bomba, centralizador, centrador, a tampa de encaixe e do furo, a quantidade de compactonite e a quantidade de areão para o maciço filtrante necessária estimada em cada furo. É de se esperar que o aumento da profundidade do furo implica um aumento no orçamento, logo, o furo 1 apresenta o menor orçamento com 2 843,44 € seguido pelo furo 2 com 3 927,05 € e com 5 571,71 € o furo 3 com o maior orçamento.

Tabela 27 - Orçamento total do furo 1 *open hole*.

Furo 1 "Open Hole"								
Classificação		Especificações						
Tubo de Revestimento	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Tubo Georoscado Liso	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
		190	201,5	170,8	9,6	29,07 €	54	1 569,8 €
Tubo de Adução	Tubo Georoscado Estriado Filtro	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Unidade	Total (€)
		190	201,5	170,8	9,6	35,78 €	10	357,8 €
União para tubo de Adução	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Hidroroscado PVC	Ø Nominal	Ø Exterior	Espessura da Rosca	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
		38,1	47,5	6,4	5,5	5,00	85,46	427,3 €
	PVC	62				3,40	1	3,4 €
Tampas de Encaixe	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
		Ø Exterior				(€/Unidade)	Unidade	Total (€)
	Tampa do Furo	200				51,00 €	1	51,00 €
	Tampa de encaixe	200				10,80 €	1	10,80 €
Acessorios	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
		Ø				(€/unidade)	Unidade	Total (€)
	Centrador	38,1				8,50 €	1	8,50 €
	Canhão bomba latão	38,1				10,00 €	1	10,00 €
	Casquilho transição inox M-M 6 cm	38,1				16,13 €	1	16,13 €
	Valvula de Retenção	38,1				22,73	1	22,73
	Centralizador	190				16	1	16
Selantes	Tipo	Quantidade (Kg)				Preço		
	Compactonite 10 / 200	25				(€/Kg)	Unidade	Total (€)
						25,00 €	2	50,00 €
Areão	Tipo	Dimensão				Preço		
	Fino	3--5				(€/Ton)	Tonelada	Total (€)
						60 €	5	300 €
Orçamento Total Furo 1							2 843,44 €	

Tabela 28 - Orçamento total do furo 2 *open hole*.

Furo 2 "Open Hole"									
Classificação		Especificações							
Tubo de Revestimento	Tipo	Dimensão (mm)				Preço			
		Tubo Georoscado Liso	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
		190	201,5	170,8	9,6	29,07 €	77	2 238,4 €	
	Tubo Georoscado Estriado Filtro	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Unidade	Total (€)	
		190	201,5	170,8	9,6	35,78 €	10	357,8 €	
Tubo de Adução	Tipo	Dimensão (mm)				Preço			
		Hidroscado PVC	Ø Nominal	Ø Exterior	Espessura da Rosca	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
		38,1	47,5	6,4	5,5	5,00	103,46	517,3 €	
União para tubo de Adução	PVC			62		3,40	1	3,4 €	
Tampas de Encaixe	Tipo	Dimensão (mm)				Preço			
						(€/metro)	Unidade	Total (€)	
		Tampa do Furo			200		51,00 €	1	51,00 €
	Tampa de encaixe			200		10,80 €	1	10,80 €	
Acessorios	Tipo	Dimensão (mm)				Preço			
					Ø	(€/unidade)	Unidade	Total (€)	
		Centrador			38,1		8,50 €	1	8,50 €
		Canhão bomba latão			38,1		10,00 €	1	10,00 €
		Casquilho transição inox M-M 6 cm			38,1		16,13 €	1	16,13 €
		Valvula de Retenção			38,1		22,73	1	22,73
	Centralizador			190		16	1	16	
Selantes	Tipo	Quantidade (Kg)				Preço			
		Compactonite 10 / 200			25	(€/Kg)	Unidade	Total (€)	
					25,00 €	3	75,00 €		
Areão	Tipo	Dimensão				Preço			
		Fino			3--5	Preço (€/Ton)	Tonelada	Total (€)	
					60 €	10	600 €		
Orçamento Total Furo 2							3 927,05 €		

Tabela 29 - Orçamento total do furo 3 *open hole*.

Furo 3 "Open Hole"								
Classificação		Especificações						
Tubo de Revestimento	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Tubo Georoscado Liso	Ø Exterior 190	Ø Exterior sobre boca 201,5	Ø Interior 170,8	Espessura 9,6	(€/metro) 29,07 €	Quantidade (m) 115	Total (€) 3 343,1 €
Tubo de Adução	Tubo Georoscado Estriado Filtro	Ø Exterior 190	Ø Exterior sobre boca 201,5	Ø Interior 170,8	Espessura 9,6	(€/metro) 35,78 €	Unidade 10	Total (€) 357,8 €
	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
União para tubo de Adução	Hidroroscado PVC	Ø Nominal 38,1	Ø Exterior 47,5	Espessura da Rosca 6,4	Espessura 5,5	(€/metro) 5,00	Quantidade (m) 126,46	Total (€) 632,3 €
	PVC	62				3,40	1	3,4 €
Tampas de Encaixe	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Tampa do Furo	200				(€/metro) 51,00 €	Unidade 1	Total (€) 51,00 €
	Tampa de encaixe	200				10,80 €	1	10,80 €
Acessorios	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Centrador	Ø 32				(€/unidade) 8,50 €	Unidade 1	Total (€) 8,50 €
	Canhão bomba latão	32				10,00 €	1	10,00 €
	Casquilho transição inox M-M 6 cm	32				16,13 €	1	16,13 €
	Valvula de Retenção	32				22,73	1	22,73
	Centralizador	190				16	1	16
Selantes	Tipo	Quantidade (Kg)				Preço		
	Compactonite 10 / 200	25				(€/Kg) 25,00 €	Unidade 8	Total (€) 200,00 €
Areão	Tipo	Dimensão				Preço		
	Fino	3--5				Preço (€/Ton) 60 €	Tonelada 15	Total (€) 900 €
Orçamento Total Furo 3							5 571,71 €	

3.2.1.2. Furo Sem Revestimento de Maciço Filtrante

O furo sem revestimento de maciço filtrante, como o nome já diz não precisa ser revestido com areão porque as características do aquífero faz com que a parede do furo seja mais consolidada, porém é necessário um tubo revestindo totalmente o furo, ao contrário do que acontece com o furo *open hole*. Os furos 1, 2 e 3 foram revestidos na sua totalidade, 70 m com tubo georoscado liso e 30 m com tubo georoscado estriado filtro, 110 m com tubo georoscado liso e 30 m com tubo georoscado estriado filtro e 170 m com tubo georoscado liso e 30 m com tubo georoscado estriado filtro respectivamente. O comprimento do tubo de adução é o mesmo, visto que a distância do furo para o reservatório não foi alterada, o número de acessórios também foi mantido. A diferença do furo sem revestimento de maciço filtrante quando comparada com o furo *open hole* é o revestimento total dos mesmos. As Tabelas 30, 31 e 32 contém todos os equipamentos escolhidos para o furo 1, 2 e 3, o furo 1 apresenta o menor orçamento com 3 724,66 € seguido pelo furo 2 com 5 343,16 € e com o maior orçamento o furo 3 com 6 986,66 €. Apesar do presente tipo de furo não necessitar de maciço filtrante, o revestimento total do furo faz com que o furo seja mais dispendioso do que o furo *open hole*.

Tabela 30 - Orçamento total do furo 1 Sem revestimento.

Furo 1 "Sem Revestimento de Maciço Filtrante"								
Classificação		Especificações						
Tubo de revestimento do Furo	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Tubo Georoscado Liso	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
		190	201,5	170,8	9,6	29,07 €	70	2 034,9 €
Tubo Georoscado Estriado Filtro	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Unidade	Total (€)	
	190	201,5	170,8	9,6	35,78 €	30	1 073,4 €	
Tubo de Adução	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Hidroroscado PVC	Ø Nominal	Ø Exterior	Espessura da Rosca	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
38,1		47,5	6,4	5,5	5,00	85,46	427,3 €	
União para tubo de Adução	PVC	62				3,40	1	3,4 €
Tampas de Encaixe	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Tampa do Furo Tampa de encaixe	Ø Exterior					Unidade	Total (€)
		200				51,00 €	1	51,00 €
200				10,80 €	1	10,80 €		
Acessorios	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Centrador Canhão bomba latão Casquilho transição inox M-M 6 cm Valvula de Retenção Centralizador	Ø				(€/unidade)	Unidade	Total (€)
		38,1				8,50 €	1	8,50 €
		38,1				10,00 €	1	10,00 €
		38,1				16,13 €	1	16,13 €
		38,1				22,73	1	22,73
200				16,5	1	16,5		
Selantes	Tipo	Quantidade (Kg)				Preço		
	Compactonite 10 / 200	25				(€/unidade)	Unidade	Total (€)
						25,00 €	2	50,00 €
Orçamento Total Furo 1							3 724,66 €	

Tabela 31 - Orçamento total do furo 2 Sem revestimento.

Furo 2 "Sem Revestimento Maciço Filtrante"								
Classificação		Especificações						
Tubo de revestimento do Furo	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Tubo Georoscado Liso	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
		190	201,5	170,8	9,6	29,07 €	120	3 488,4 €
Tubo Georoscado Estriado Filtro	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Unidade	Total (€)	
	190	201,5	170,8	9,6	35,78 €	30	1 073,4 €	
Tubo de Adução	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Hidroroscado PVC	Ø Nominal	Ø Exterior	Espessura da Rosca	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
		38,1	47,5	6,4	5,5	5,00	103,46	517,3 €
União para tubo de Adução	PVC	62			3,40	1	3,4 €	
Tampas de Encaixe	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Tampa do Furo	200				(€/metro)	Unidade	Total (€)
		51,00 €					1	51,00 €
Tampa de encaixe	200				10,80 €	1	10,80 €	
Acessorios	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Centrador	Ø				(€/unidade)	Unidade	Total (€)
		38,1				8,50 €	1	8,50 €
		38,1				10,00 €	1	10,00 €
		38,1				16,13 €	1	16,13 €
		38,1				22,73	1	22,73
Centralizador	200				16,5	1	16,5	
Selantes	Tipo	Quantidade (Kg)				Preço		
	Compactonite 10 / 200	25				(€/Unidade)	Unidade	Total (€)
						25,00 €	5	125,00 €
Orçamento Total Furo 2							5 343,16 €	

Tabela 32-Orçamento total do furo 3 Sem revestimento.

Furo 3 "Sem Revestimento Maciço Filtrante"								
Classificação		Especificações						
Tubo de Revestimento	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Tubo Georoscado Liso	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
		190	201,5	170,8	9,6	29,07 €	170	4 941,9 €
Tubo de Adução	Tubo Georoscado Estriado Filtro	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Unidade	Total (€)
		190	201,5	170,8	9,6	35,78 €	30	1 073,4 €
União para tubo de Adução	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Hidrooscado PVC	Ø Nominal	Ø Exterior	Espessura da Rosca	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
		38,1	47,5	6,4	5,5	5,00	126,46	632,3 €
Tampas de Encaixe	PVC			62		3,40	1	3,4 €
	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Tampa do Furo			200		(€/metro) <td>Unidade</td> <td>Total (€)</td>	Unidade	Total (€)
				200		51,00 €	1	51,00 €
	Tampa de encaixe			200		10,80 €	1	10,80 €
Acessorios	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
				Ø		(€/unidade) <td>Unidade</td> <td>Total (€)</td>	Unidade	Total (€)
	Centrador			32		8,50 €	1	8,50 €
	Canhão bomba latão			32		10,00 €	1	10,00 €
	Casquilho transição inox M-M 6 cm			32		16,13 €	1	16,13 €
	Valvula de Retenção			32		22,73	1	22,73
Centralizador			200		16,5	1	16,5	
Selantes	Tipo	Quantidade (Kg)				Preço		
	Compactonite 10 / 200			25		(€/Unidade) <td>Unidade</td> <td>Total (€)</td>	Unidade	Total (€)
				25		25,00 €	8	200,00 €
Orçamento Total Furo 3							6 986,66 €	

3.2.1.3. Furo com Revestimento de Maciço Filtrante

Para o dimensionamento do furo com revestimento de maciço filtrante diferentemente do furo sem revestimento de maciço filtrante, foi adicionado o componente areão para revestir por completo o furo, para além do tubo de revestimento necessário também em toda a sua profundidade assim como foi feito no furo sem revestimento de maciço filtrante. O furo com revestimento de maciço filtrante contém igualmente todos os materiais utilizados no furo sem revestimento de maciço filtrante, sendo unicamente adicionado o componente areão para o maciço filtrante, como mostram as Tabelas 33, 34 e 35 com os dados dos furos 1, 2 e 3. O furo com revestimento de maciço filtrante é o mais dispendioso de entre os três tipos de furos analisados uma vez que necessita de um revestimento total com tubagem e um revestimento total com maciço filtrante e como observado até agora no orçamento em cada tipo de furo, o furo 1 apresenta o menor orçamento com 4 624,2 € seguido pelo furo 2 com 6 542,7 € e com o maior orçamento o furo 3 com 8 411,2 €.

Tabela 33 - Orçamento total do furo 1 Com Revestimento.

Furo 1 "Com Revestimento Maciço Filtrante"								
Classificação		Especificações						
Tubo de Revestimento	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Tubo Georoscado Liso	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
		190	201,5	170,8	9,6	29,07 €	70	2 034,9 €
	Tubo Georoscado Estriado Filtro	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Unidade	Total (€)
		190	201,5	170,8	9,6	35,78 €	30	1 073,4 €
Tubo de Adução	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Hidroroscado PVC	Ø Nominal	Ø Exterior	Espessura da Rosca	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
		38,1	47,5	6,4	5,5	5,00	85,46	427,3 €
União para tubo de Adução	PVC	62				3,40	1	3,4 €
Tampas de Encaixe	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
		Ø Exterior				(€/Unidade)	Unidade	Total (€)
	Tampa do Furo	200				51,00 €	1	51,00 €
	Tampa de encaixe	200				10,80 €	1	10,80 €
Acessorios	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
		Ø				(€/unidade)	Unidade	Total (€)
	Centrador	38,1				8,50 €	1	8,50 €
	Canhão bomba latão	38,1				10,00 €	1	10,00 €
	Casquilho transição inox M-M 6 cm	38,1				16,13 €	1	16,13 €
	Valvula de Retenção	38,1				22,73	1	22,73
	Centralizador	190				16	1	16
Selantes	Tipo	Quantidade (Kg)				Preço		
	Compactonite 10 / 200	25				(€/unidade)	Unidade	Total (€)
						25,00 €	2	50,00 €
Areão	Tipo	Dimensão				Preço		
	Fino	3--5				(€/Ton)	Tonelada	Total (€)
						60 €	15	900 €
Orçamento Total Furo 1							4 624,2 €	

Tabela 34 - Orçamento total do furo 2 Com Revestimento.

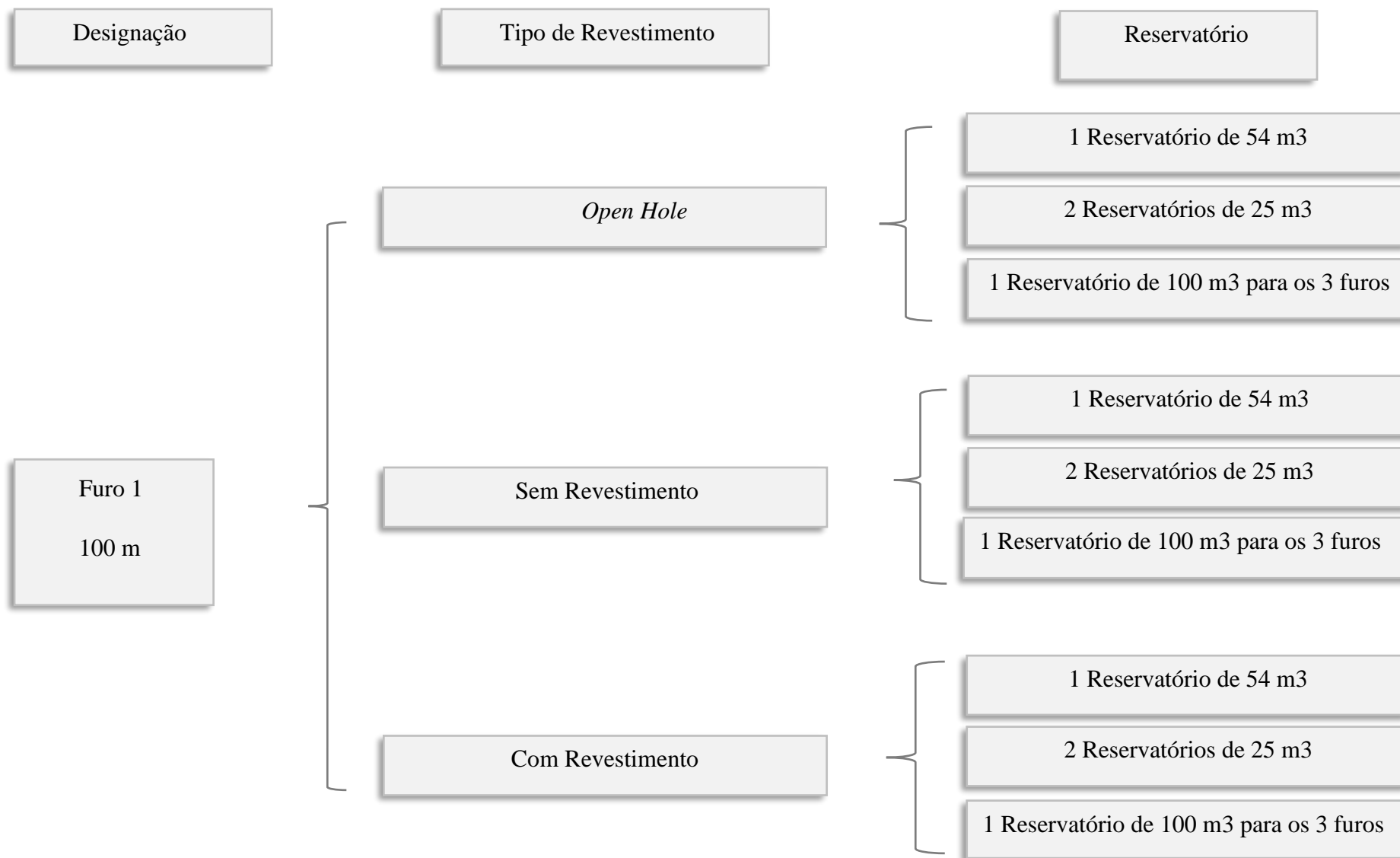
Furo 2 "Com Revestimento Maciço Filtrante"								
Classificação		Especificações						
Tubo de Revestimento	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
		Tubo Georoscado Liso	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)
		190	201,5	170,8	9,6	29,07 €	120	3 488,4 €
	Tubo Georoscado Estriado Filtro	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Unidade	Total (€)
		190	201,5	170,8	9,6	35,78 €	30	1 073,4 €
Tubo de Adução	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Hidroroscado PVC	Ø Nominal	Ø Exterior	Espessura da Rosca	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
		38,1	47,5	6,4	5,5	5,00	103,46	517,3 €
União para tubo de Adução	PVC			62		3,40	1	3,4 €
Tampas de Encaixe	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Tampa do Furo			200		(€/metro)	Unidade	Total (€)
				200		51,00 €	1	51,00 €
	Tampa de encaixe			200		10,80 €	1	10,80 €
Acessorios	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
				Ø		(€/unidade)	Unidade	Total (€)
	Centrador			38,1		8,50 €	1	8,50 €
	Canhão bomba latão			38,1		10,00 €	1	10,00 €
	Casquilho transição inox M-M 6 cm			38,1		16,13 €	1	16,13 €
	Valvula de Retenção			38,1		22,73	1	22,73
	Centralizador			190		16,5	1	16
Selantes	Tipo	Quantidade (Kg)				Preço		
	Compactonite 10 / 200			25		(€/unidade)	Unidade	Total (€)
				25		25,00 €	5	125,00 €
Areão	Tipo	Dimensão				Preço		
	Fino			3--5		(€/Ton)	Tonelada	Total (€)
				3--5		60 €	20	1 200 €
Orçamento Total Furo 2							6 542,7 €	

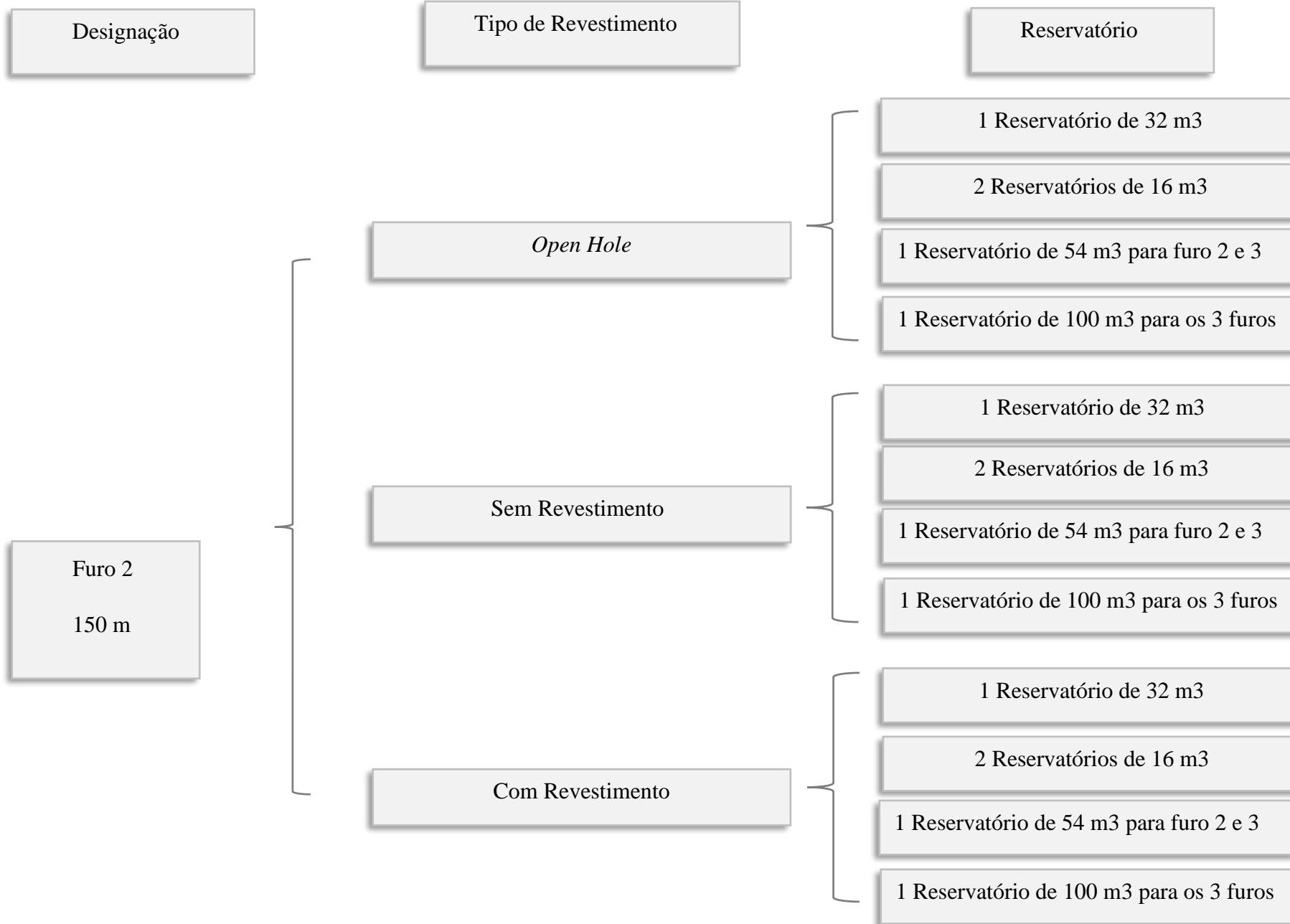
Tabela 35-Orçamento total do furo 3 Com Revestimento.

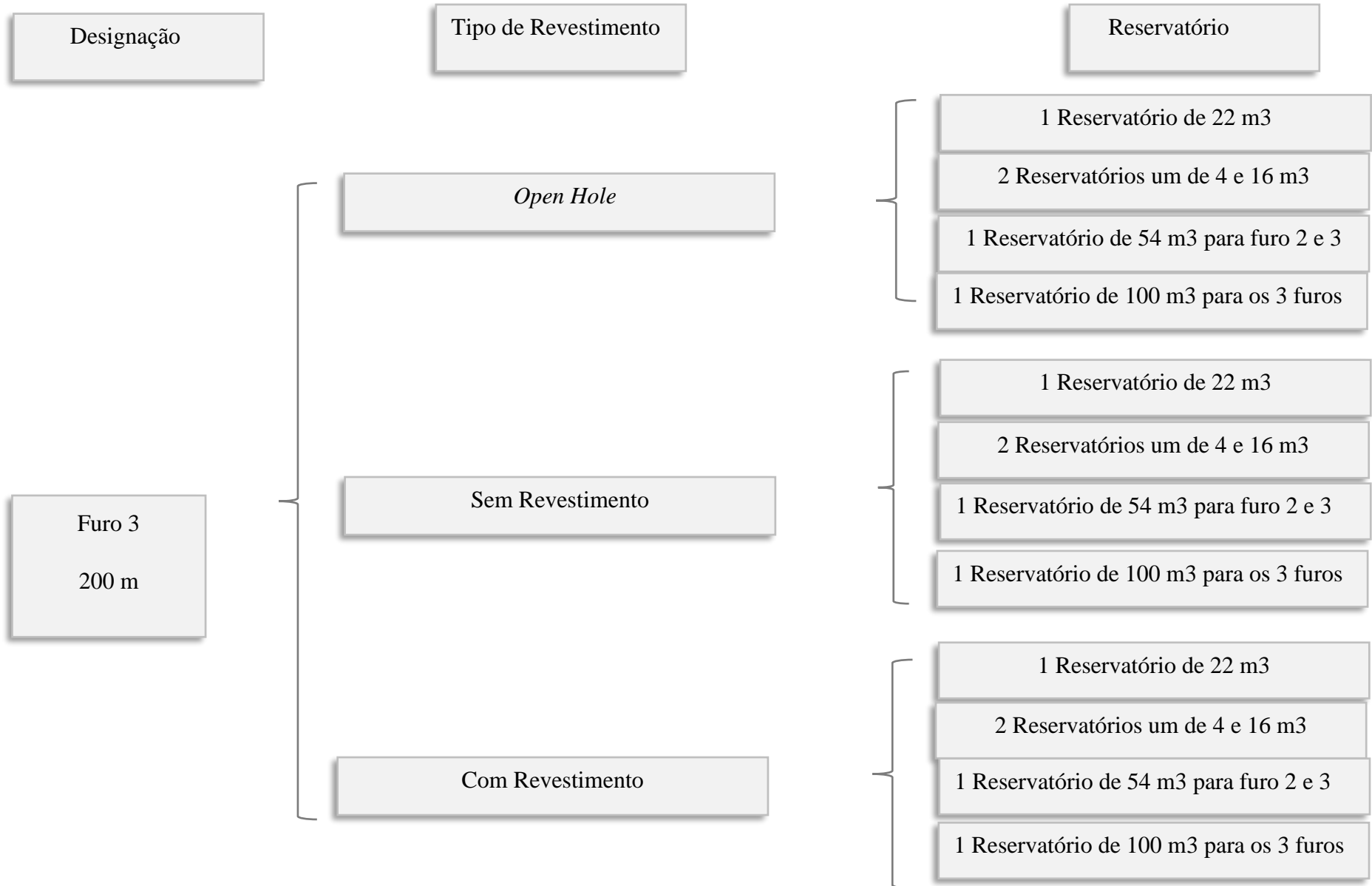
Furo 3 "Com Revestimento Maciço Filtrante"								
Classificação		Especificações						
Tubo de Revestimento	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Tubo Georoscado Liso	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
		190	201,5	170,8	9,6	29,07 €	170	4 941,9 €
Tubo Georoscado Estriado Filtro	Ø Exterior	Ø Exterior sobre boca	Ø Interior	Espessura	(€/metro)	Unidade	Total (€)	
	190	201,5	170,8	9,6	35,78 €	30	1 073,4 €	
Tubo de Adução	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Hidroroscado PVC	Ø Nominal	Ø Exterior	Espessura da Rosca	Espessura	(€/metro)	Quantidade (m)	Total (€)
38,1		47,5	6,4	5,5	5,00	126,46	632,3 €	
União para tubo de Adução	PVC	62			3,40	1	3,4 €	
Tampas de Encaixe	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Tampa do Furo	200				(€/metro)	Unidade	Total (€)
		51,00 €					1	51,00 €
Tampa de encaixe	200				10,80 €	1	10,80 €	
Acessórios	Tipo	Dimensão (mm)				Preço		
	Centrador	Ø				(€/unidade)	Unidade	Total (€)
		32				8,50 €	1	8,50 €
		32				10,00 €	1	10,00 €
		32				16,13 €	1	16,13 €
		32				22,73	1	22,73
Centralizador	190				16	1	16	
Selantes	Tipo	Quantidade (Kg)				Preço		
	Compactonite 10 / 200	25				(€/unidade)	Unidade	Total (€)
						25,00 €	5	125,00 €
Areão	Tipo	Dimensão				Preço		
	Fino					(€/Ton)	Tonelada	Total (€)
						60 €	25	1 500 €
Orçamento Total Furo 3							8 411,2 €	

3.3. Configuração do Sistema

A configuração do sistema mostra como será feita a ligação entre cada componente do sistema de bombagem, uma vez que a água bombeada por cada um dos furos será armazenada como já foi mencionado, diferentes “combinações” entre os reservatórios e os furos. A capacidade de armazenamento foi variado em cada um dos cenários com o objetivo de obter o cenário mais barato possível, satisfazendo sempre a necessidade de armazenamento de cada furo. No primeiro cenário o furo 1, 2 e 3 será ligado a um reservatório respectivamente. No segundo cenário cada furo será ligado a dois reservatórios e no terceiro cenário o furo 2 e 3 serão ligados a um único reservatório no quarto cenário todos os três furos serão ligados a um único reservatório. Todos esses cenários serão analisados para cada furo com os diferentes tipos de revestimento, o esquema de ligação 2, 3 e 4 mostra detalhadamente como é a configuração dos diferentes cenários e o capacidade de armazenamento de cada um dos reservatórios escolhidos, os mesmos foram escolhidos para que o orçamento seja o menos dispendioso possível.







3.4. Caracterização dos Equipamentos

A caracterização dos equipamentos, permite conhecer cada um dos equipamentos selecionados para o SFV. Em seguida será descrito cada um dos componentes, como painel fotovoltaico, conjunto motobomba, cabos e dispositivos de proteção e os respectivos custos.

3.4.1. Painel Fotovoltaico

Para a escolha do módulo fotovoltaico, foi analisado um módulo que possua uma maior densidade de potência, ou seja, com base na relação entre potência e a área do módulo fotovoltaico. Ademais, a escolha de um módulo com menores dimensões e com potência elevada garante uma melhor otimização quanto a área de instalação, pois influencia em um menor afastamento entre painéis devido ao possível sombreamento dos mesmos. O módulo escolhido foi o Akcome SK6612P (ver Figura 11) de potência nominal 330W, contém 72 células do tipo policristalino, com 1,957 m de comprimento, 992 m de largura e 40 m de altura e uma eficiência de 17,0%, os demais dados técnicos do módulo estão na Tabela 19. O painel tem um custo por unidade de 121 €, a relação potência/valor do módulo definiu a sua escolha. Isto porque, também foi analisado o módulo LG Neon 2 LG 340 NIC-V5, que contém 60 células do tipo monocristalino, de potência nominal 340 W, com 1,686 m de comprimento, 1,016 m de largura e 40 m de largura e 19,8% de eficiência. O módulo tem um custo por unidade de 264€.



Figura 11- Módulo fotovoltaico Akcome 330 W. Fonte: [54].

3.4.2. Conjunto Motobomba

O conjunto motobomba consiste em uma bomba acoplamento a um motor. É possível encontrar o conjunto em diversas capacidades, que são variáveis em relação ao caudal,

pressão, potência, tensão, tamanho e muitas outras características [34]. A figura 12 ilustra o conjunto motobomba submersível da GRUNDFOS.



Figura 12-Conjunto motobomba Grundfos. Fonte: [55]

O conjunto motobomba selecionado para o furo 1. Foi feito tendo em conta as características do furo como a altura manométrica que é 84,94 m e o caudal médio necessário de $8,33 \text{ m}^3/h$. O conjunto escolhido foi o da Grundfos SP 9-21, capaz de bombear $9 \text{ m}^3/h$ de água a uma altura manométrica nominal máxima de 110,8 m, o motor possui uma potência de 4 kW, uma tensão nominal de 220/230 V e uma corrente nominal de 17,4/17,6 A, a um custo de 2 786 €. Os demais dados técnicos do conjunto motobomba estão a Tabela 36.

Tabela 36 - Dados técnicos do Conjunto motobomba SP 9_21 do Furo 1.

Conjunto motobomba SP 9-21					
Equipamento	Marca	Modelo	Dados técnicos		
Bomba	Grundfos	SP 9-21	Caudal nominal:	9	m^3/h
			Altura manométrica nominal	110	m
			Temperatura máxima do líquido	40	$^{\circ}\text{C}$
			Temperatura do líquido durante operação	20	$^{\circ}\text{C}$
Motor	Grundfos	MS 4000 T40	Potência nominal	4	kW
			Velocidade nominal	2865/2875	rpm
			Tensão nominal	3x220-230	V
			Corrente nominal	17,4 - 17,6	A
			Corrente de arranque	520 - 540	%
			Cos phi - factor de potência	0,77-0,73	
Preço			2 786,00 €		

Para o furo 2 o conjunto motobomba também cumpre os requisitos necessários para a satisfação de abastecimento de água de $5 \text{ m}^3/h$ de água a uma altura manométrica de 102,10 m. O conjunto motobomba escolhido é o SP 7-27 também da Grundfos com um

valor de 2 578 €. Pode bombear $7 \text{ m}^3/\text{h}$ de água a uma altura manométrica máxima de 124 m, o motor precisa de ser alimentado com um potência de 4 kW, uma tensão nominal de 220/230 V e uma corrente nominal de 17,4/17,6 A, os demais dados técnicos do conjunto estão na Tabela 37.

Tabela 37 - Dados técnicos do Conjunto motobomba SP 7-27 do Furo 2.

Conjunto motobomba SP 7-27					
Equipamento	Marca	Modelo	Dados técnicos		
Bomba		SP 7-27	Caudal nominal:	7	m^3/h
			Altura manométrica nominal	124	m
			Temperatura máxima do líquido	40	$^{\circ}\text{C}$
			Temperatura do líquido durante operação	20	$^{\circ}\text{C}$
Motor	Grundfos	MS 4000 T40	Potência nominal	4	kW
			Velocidade nominal	2865/2875	rpm
			Tensão nominal	3 x 220-230	V
			Corrente nominal	17,4 - 17,6	A
			Corrente de arranque	520 - 540	%
			Cos phi - factor de potência	0,77-0,73	
Preço			2 578,00 €		

O furo 3 é o que possui a maior altura manométrica com 124,95 m e fornece o menor caudal médio $2,86 \text{ m}^3/\text{h}$. Para cumprir os requisitos necessários o conjunto motobomba escolhido foi o SP 5A-33 que pode bombear $5 \text{ m}^3/\text{h}$ de água numa altura manométrica máxima de 155 m. O motor possui uma potência de 3 kW, 220/230 V de tensão e uma corrente nominal de 14,2/14,6 A, com um custo de 1 736 €, ver Tabela 38.

O preço do conjunto motobomba, varia consoante a potência do motor a altura manométrica de bombagem e o caudal bombeada pela bomba. Em uma análise comparativa entre os diferentes conjuntos capazes de cumprir as necessidades de cada furo, como mostra a Tabela 21, foram escolhidos os conjuntos que satisfaçam essas necessidades com o menor custo possível.

Tabela 38 - Dados técnicos do Conjunto motobomba SP 5A-33 do Furo 3.

Conjunto motobomba SP 5A-33					
Equipamento	Marca	Modelo	Dados técnicos		
Bomba		SP 5A-33	Caudal nominal	3	m ³ /h
			Altura manométrica nominal	135	m
			Temperatura máxima do líquido	40	°C
			Temperatura do líquido durante operação	20	°C
Motor	Grundfos	MS 4000 T40	Potência nominal	3	kW
			Velocidade nominal	2865/2875	rpm
			Tensão nominal	3 x 220-230	V
			Corrente nominal	14,2 - 14,6	A
			Corrente de arranque	480 - 490	%
			Cos phi - factor de potência	0,77-0,73	
Preço			1 736,00 €		

3.4.3. Inversor DC-AC

Um inversor DC-AC, será utilizado para transformar a DC fornecida pelo gerador fotovoltaico em AC para alimentar a motor [39]. Os inversores escolhidos para todos os furos são da Sunny Tripower e possuem uma potência de 5.0 kW, e tem um custo de 1 290 €. Na figura 14 encontrada ilustrada o inversor *Sunny Tripower 5.0*.



Figura 13- Inversor *Sunny Tripower 5.0*.

3.4.4. Conversor de Frequência AC-AC

O CF é um controlador capaz de acionar um motor elétrico e ao mesmo tempo variar a frequência e a tensão que é fornecida ao motor com o objetivo de controlar a sua velocidade e potência consumida. Os CFs escolhidos para cada furo, foram sobredimensionados para garantir o melhor funcionamento dos conjuntos motobomba de

cada furo. O aumento da potência e da corrente nos CFs, implicam no aumento dos custos do equipamento, por isso, a relação eficiência/custo foi levada em conta, para garantir o bom funcionamento do sistema e um menor orçamento. Na figura 13 é possível ver o conversor de frequência da ABB ACS355-03E escolhido de acordo com a necessidade de cada furo



Figura 14 - Conversor de frequência da ABB ACS355-03E. Fonte: [56].

O CF escolhido para o furo 1 e 2, possui valores superiores tanto na potência como na corrente, o que implica um maior custo no equipamento, 937 €, quando comparada com o CF escolhido para o furo 3, que possui um custo de 674 €, pois tem uma potência e corrente menor [56].

3.4.5. Interruptor DC

O interruptor DC é recomendado para ligar e desligar cargas DC de corte brusco e assegurar o isolamento entre o CF e a matriz fotovoltaico. O calibre do aparelho depende da instalação, do esquema de ligação e da tensão DC aplicada aos seus terminais [47]. Sendo assim, os interruptores DC para cada furo, cumprem os requisitos como o tipo de tensão de alimentação e a tensão estipulada de utilização. Na figura 14 encontra-se ilustrada o interruptor DC da marca Tangou, escolhido para os furos 1, 2 e 3. O interruptor 2P 32A 6KA DC, apresenta um maior custo com 24,99 €.



Figura 15- Interruptor Tangou 2P 32 A. Fonte: [57].

3.4.6. Disjuntor AC

Os disjuntores AC selecionado para cada um dos furos, são da Hager, possuem três polos para ligação das fases. Cada um cumpre os requisitos necessários no circuito elétrico de cada furo. Na figura 15 está ilustrada o disjuntor 3P AC 6/10KA 3M selecionado para os 3 furos.



Figura 16-Disjuntor 3P AC 6/10KA 3M. Fonte: [49].

Assim como foi observado no custo dos interruptores DC, o custo do disjuntor AC também aumenta com o aumento da corrente geral do dispositivo, no entanto a diferença observada é bastante pequena. Para o circuito elétrico do furo 1 e 2 o disjuntor tem um custo de 47,97 € já para o furo 3 o custo é de 46,07 €.

3.4.7. Cabos DC

A qualidade dos cabos utilizados no circuito elétrico, influencia no bom funcionamento do mesmo. Recomenda-se o uso de cabos blindados, uma vez que reduz a emissão eletromagnética de todo o sistema de conversor de frequência assim como as correntes do motor e o desgaste nas chumaceiras⁷ [42]. Para estabelecer a ligação entre os módulos, utilizou-se condutores PV ZZ-F Solar Preto, com 10 mm² de seção para o circuito elétrico do furo 1 e 2 e 6 mm² de seção para o circuito elétrico furo 3. No polo positivo do circuito DC foi escolhido o condutor RV-K Vermelho e para o polo negativo foi escolhido novamente o condutor PV ZZ-F Solar Preto. Os cabos são feitos de cobre eletrolítico recozido e estanhado, composição classe 5⁸, isolados em borracha livre de halogéneos, tipo EI6 segundo a norma EN 50363-1 e a bainha exterior em borracha livre de halogéneos, tipo EM8 segundo a norma EN 50363-6 [50]. Na figura 16 encontra-se

⁷ Chumaceiras- dispositivo mecânico fixo, utilizado para a ligação condução e suporte de veios no motor

⁸ Classe 5- cabos flexíveis.

ilustrada o cabo RV-K Vermelho e o cabo PV ZZ-F Solar Preto, os cabos têm uma camada adicional de isolamento protetor sobre o isolamento funcional para fornecer isolamento duplo.



Figura 17- Cabo principal DC, para polo positivo e negativo do circuito elétrico dos furos.

Fonte: [58] [59].

3.4.8. Cabos AC

Os cabos de alimentação dos motores, cabos AC, pertencem a marca BELDEN, são flexíveis, possuem blindagem em cobre, uma alta resistência à radiação UV e temperaturas elevadas. Possuem três condutores de fases em XLPE⁹ de cor preto e a terra em verde e amarelo em PVC [60], como se encontra ilustrada na figura 17.



Figura 18- Cabos BELDEN com 4 condutores para alimentação do motor no furo 1, 2 e 3. Fonte: [51].

Os cabos escolhidos para os circuitos AC são os mais caros, porque para além de terem quatro condutores em XLPE, os cabos possuem blindagem em cobre. Os cabos com 6 mm^2 de seção têm um custo de 7,41 €/m e os cabos com 10 mm^2 custam 8,23 €/m. Já os cabos escolhidos para os circuitos DC, são os mais baratos. Entretanto os cabos com secções maiores, 10 mm^2 , são os mais baratos custando 3 €/m, ao contrário dos cabos com secções menores 6 mm^2 que custam 3,61 €/m.

⁹ XLPE- Polietileno Reticulado.

Capítulo 4

4. Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta o orçamento obtido das configurações criadas para o sistema e a sua otimização para encontrar a melhor solução economicamente viável ou a solução ótima do projeto. Apresenta também a discussão das soluções encontradas e os impactos económicos e sociais do sistema projetado na comunidade.

4.2. Orçamento das Configurações

As diferentes configurações dos furos requer um orçamento diferente para cada uma dessas configurações, ao longo do sistema de dimensionamento diferentes equipamentos foram escolhidos, são esses que afetaram o orçamento final de cada furo dependendo da sua configuração de ligação e do número de equipamentos.

No primeiro cenário, cada furo encontram-se ligado a um reservatório, o orçamento dos furos com revestimento *open hole* mostra ser o mais barato para qualquer profundidade quando comparado com o orçamento do furo sem revestimento de maciço filtrante e furo com revestimento de maciço filtrante. É de se esperar que os furos com maiores profundidades possuam um orçamento maior, porém não foi esse o cenário observado como mostra a Tabela 39, o furo com 100 m de profundidade possui o maior orçamento para furo com revestimento *open hole*. Este cenário explica-se pelo facto de o furo 1 necessitar de maior número de módulos fotovoltaicos e um conjunto motobomba de maior potência visto que é o furo que fornece o maior caudal e o possui também uma distância maior do furo para o reservatório. Todos esses aspetos influenciam no orçamento final de 13 875,18 € do furo 1, contra 13 222,11 € do furo 2 e 13 583,67 € do furo 3, tendo o furo 2 o menor orçamento.

Para furos sem revestimento de maciço filtrante o cenário é outro, o furo 3 possui o maior orçamento com 14 998,62 € um valor ligeiramente maior que o orçamento do furo 1 com 14 756,40 €, o furo 2 continua sendo o furo com menor orçamento com 14 638,22 €. O mesmo cenário é observado para furos com revestimento de maciço filtrante, o furo 3

possui o maior orçamento com 16 423,12 € contra 15 655,90 € do furo 1. O furo 2 continua sendo o furo com menor orçamento com 15 583,67 €. O furo 1 é o furo com menor profundidade, porém em nenhum cenário teve o menor orçamento, pelo contrário, o seu orçamento não se distancia muito do orçamento requerido pelo maior furo, o furo 3. Isso explica-se porque apesar do furo 1 requerer o menor orçamento para a construção do furo, o seu sistema fotovoltaico é o que requer o maior orçamento, já o furo 3 requer o menor orçamento no seu sistema fotovoltaico e maior orçamento para a construção do furo, isso faz com que o furo 1 e 3 possuam valores muito próximos. Uma vez que o furo 2 é um intermédio entre o furo 1 e 3 e requer menos orçamento no sistema fotovoltaico comparado com o furo 1 e também menos orçamento para construção do furo comparado com o furo 3, faz com que o furo 2 seja o mais barato em todos esses cenários analisados.

Tabela 39 - Orçamento de cada um dos furos para cada tipo de revestimento ligado a um reservatório.

Designação	Tipo de Revestimento	Reservatório (m^3)	Orçamento
Furo 1	<i>Open Hole</i>	54	13 875,18 €
	Sem Revestimento de Maciço Filtrante		14 756,40 €
	Com Revestimento de Maciço Filtrante		15 655,90 €
Furo 2	<i>Open Hole</i>	32	13 222,11 €
	Sem Revestimento de Maciço Filtrante		14 368,22 €
	Com Revestimento de Maciço Filtrante		15 837,72 €
Furo 3	<i>Open Hole</i>	22	13 583,67 €
	Sem Revestimento de Maciço Filtrante		14 998,42 €
	Com Revestimento de Maciço Filtrante		16 423,12 €

O orçamento do próximo cenário a ser analisado, é a configuração do sistema com os furos ligados a dois reservatório cada um. Esse cenário mostra ser mais dispendioso do que o primeiro cenário analisado como mostra a Tabela 40. O furo 2 continua sendo o furo com menor orçamento, nesse cenário o furo 1 possui o maior orçamento para os três tipos de revestimento ao contrario do que foi observado no cenário anterior, sendo mais dispendioso somente no furo com revestimento open hole. O furo 1 tem um orçamento para o furo open hole, sem revestimento de maciço filtrante e com revestimento de maciço filtrante de 15 210,18 €, 16 091,40 € e 16 990,90 € respectivamente, houve um aumento de 1 335 € no orçamento comparada ao cenário anterior. Para o furo 2 o aumento no

orçamento foi de 1 108 €, para o furo com revestimento open hole o orçamento é de 14 330,11 €, para furo sem revestimento de maciço filtrante e com revestimento de maciço filtrante o orçamento é de 15 746,22 € e 16 945,72 € respetivamente. O menor aumento no orçamento observado nesse cenário foi no furo 3 com 608 € de acréscimo, para o furo open hole, sem revestimento de maciço filtrante e com revestimento de maciço filtrante o orçamento foi de 14 191,67 €, 15 606,62 € e 17 031,12 € respetivamente

Tabela 40 - Orçamento de cada um dos furos para cada tipo de revestimento ligado a dois reservatórios.

Designação	Tipo de Revestimento	Reservatório (m³)	Orçamento
Furo 1	<i>Open Hole</i>		15 210,18 €
	Sem Revestimento de Maciço Filtrante	2x25	16 091,40 €
	Com Revestimento de Maciço Filtrante		16 990,90 €
Furo 2	<i>Open Hole</i>		14 330,11 €
	Sem Revestimento de Maciço Filtrante	2x16	15 746,72 €
	Com Revestimento de Maciço Filtrante		16 945,72 €
Furo 3	<i>Open Hole</i>		14 191,67 €
	Sem Revestimento de Maciço Filtrante	1x4;1x16	15 606,62 €
	Com Revestimento de Maciço Filtrante		17 031,12 €

A configuração de ligação dos furos 2 e 3 no mesmo reservatório mostra ser menos dispendioso quando analisadas a Tabela 41. Quando ligadas ao mesmo reservatório o orçamento total do furo 2 e 3 para o furo *open hole*, sem revestimento de maciço filtrante e com revestimento de maciço filtrante é de 24 529,78 €, 27 360,84 € e 29 984,84 € respetivamente, porém quando ligadas a reservatórios diferentes o orçamento para o furo *open hole* é de 26 805,78 €, sem revestimento de maciço filtrante 29 636,84 € e com revestimento de maciço filtrante é de 32 260,84 €, sendo assim houve um diminuição de 2 276 € no orçamento total do furo 2 e 3 quando ligadas ao mesmo reservatório. Essa configuração foi realizada somente para o furo 2 e 3 porque são os furos que possuem o menor volume de bombagem diária.

Tabela 41 - Orçamento total dos furos 2 e 3 para cada tipo de revestimento ligado a um único reservatório e ligados a um reservatório cada furo.

Designação	Tipo de Revestimento	Reservatório (m ³)	Orçamento
Furo 2 e 3	<i>Open Hole</i>		24 529,78 €
	Sem Revestimento de Maciço Filtrante	1x54	27 360,84 €
	Com Revestimento de Maciço Filtrante		29 984,84 €
	<i>Open Hole</i>		26 805,78 €
	Sem Revestimento de Maciço Filtrante	1x32;1x22	29 636,84 €
	Com Revestimento de Maciço Filtrante		32 360,84 €

Para satisfazer a necessidade diária estimada será necessário três furos de captação como foi dimensionado. Os diferentes cenários criados permitem avaliar diferentes soluções a fim de encontrar a melhor solução, ou seja, a acessível financeiramente. Em seguida será analisada o orçamento total do sistema para cada cenário criado e a melhor solução encontrada. Na Tabela 42 é possível ver o orçamento total dos três furos ligados a um reservatório cada um para os três tipos de revestimento. O orçamento total do sistema com os furos ligados a um reservatório cada e com revestimento *open hole* é o mais acessível, com 40 680,96 €, seguido pelos furos sem revestimento de maciço filtrante com 44 393,24 €, o maior orçamento de todos é para os furos com revestimento de maciço filtrante com 47 916,74 €.

Tabela 42 - Orçamento total dos furos para cada tipo de revestimento com um reservatório.

Orçamento Total dos Furos ligados a 1 reservatório cada furo.	
Furos <i>Open Hole</i>	40 680,96 €
Furos Sem Revestimento de Maciço Filtrante	44 393,24 €
Furos Com Revestimento de Maciço Filtrante	47 916,74 €

O cenário com os furos ligados a dois reservatório é de se esperar que seja o mais dispendioso que o cenário anterior, visto que o orçamento de cada um dos furos ligados a dois reservatório foi mais caro. Para o sistema de furos com revestimento *open hole* é o cenário mais barato com 43 731,96 €, seguido pelo sistema de furos sem revestimento de maciço filtrante com um orçamento de 47 444,24 €, o maior orçamento é para o

sistema com os furos com revestimento de maciço filtrante com 50 967,74 €, este tipo de configuração do sistema implica num acréscimo de 3 051 € no orçamento final de cada solução, ver Tabela 43.

Tabela 43- Orçamento total dos furos para cada tipo de revestimento ligado a dois reservatórios.

Orçamento Total dos Furos com 2 Reservatórios cada furo	
Furos <i>Open Hole</i>	43 731,96 €
Furos Sem Revestimento de Maciço Filtrante	47 444,24 €
Furos Com Revestimento de Maciço Filtrante	50 967,74 €

A diminuição no número de reservatórios implica na diminuição do orçamento, o cenário em que o furo 1 é ligado a um reservatório e o furo 2 e 3 são ligados a outro reservatório é o que mostra ser o mais barato até agora. Para o sistema de furos com revestimento *open hole* o orçamento é de 38 404,96 € e para o sistema de furos sem revestimento de maciço filtrante e com revestimento de maciço filtrante o orçamento é de 42 117,24 € e 45 640,74 € respetivamente, ver Tabela 44. Essa configuração consiste numa diminuição de 2 276 € em relação a configuração de ligação dos furos a um reservatório cada um, já para a configuração em que os furos estão ligados a dois reservatório cada um a diminuição no orçamento foi de 5 327 €.

Tabela 44 - Orçamento total dos furos para cada tipo de revestimento com furo 1 ligado a um reservatório e furo 2 e 3 ligado a outro reservatório.

Orçamento Total dos Furos, com Furo 1 um reservatório e furo 2 e 3 um reservatório	
Furos <i>Open Hole</i>	38 404,96 €
Furos Sem Revestimento de Maciço Filtrante	42 117,24 €
Furos Com Revestimento de Maciço Filtrante	45 640,74 €

Analisando o último cenário em que a configuração dos furos consiste na ligação dos mesmos a um único reservatório, observa-se que o este cenário é o mais barato de todos os cenários traçados, como é possível ver na Tabela 45. O sistema com furos de revestimento *open hole* possui um orçamento de 35 360,96 € e para o sistema de furos sem revestimento de maciço filtrante e com revestimento de maciço filtrante o orçamento

é de 39 073,24 € e 42 596,74 € respetivamente. Fazendo uma comparação entre o primeiro cenário em que o sistema consiste em furos ligados a diferentes reservatórios com o último cenário em análise, houve uma diminuição no orçamento final de 5 320 €.

Tabela 45 - Orçamento total dos furos para cada tipo de revestimento ligados a um único reservatório.

Orçamento Total dos Furos com 1 Reservatório	
Furos <i>Open Hole</i>	35 360,96 €
Furos Sem Revestimento de Maciço Filtrante	39 073,24 €
Furos Com Revestimento de Maciço Filtrante	42 596,74 €

Conhecendo o orçamento final de todos os cenários traçados, o cenário em que a configuração do sistema consiste na ligação dos três furos a um único reservatório é a mais barata de todas para qualquer que seja o tipo de revestimento dos furos. Sendo assim essa é a configuração escolhida para satisfazer os 95 m³ de volume de água requerida diariamente pelo campo de plantação.

4.3. Otimização do Sistema

A otimização procura os valores das variáveis do projeto como: orçamento do sistema fotovoltaico; conjunto motobomba; revestimento do furo e do reservatório para obter a solução ótima capaz de satisfazer as necessidades diárias do campo agrícola, dentro das suas restrições. Para encontrar a solução ótima capaz de satisfazer a necessidade diária de 95 m³ de água, recorreu-se ao método Algoritmo Genético, sendo um método para fornecer soluções ótimas capazes de resolver um determinado problema. O AG é composto por seis etapas:

1. Inicialização: o AG inicia quando as soluções denominadas populações (compostas por indivíduos) são geradas aleatoriamente, uma população pode ter qualquer tamanho.

2. Avaliação: durante a avaliação todos os membros da população são classificados de acordo com o nível de capacidade, quanto mais alto o nível de capacidade mais hipóteses os indivíduos pertence á população seguinte.
3. Seleção: a fase de seleção serve para eliminar os indivíduos considerados com má avaliação, ou seja, com baixo nível de capacidade.
4. *Crossover*: ou reprodução é a fase em que dois indivíduos são “cruzados” para criar ou reproduzir indivíduos mais adequadas do que as originais.
5. Mutação: o processo de mutação serve para fazer pequenas alterações nos indivíduos, eliminando os resultados idênticos resultante da operação. A fase de mutação é vital porque, garante que a população é geneticamente diversa.
6. Repetição: a última fase é o número de vezes em que a população passa pelo processo de avaliação, seleção, crossover e mutação [61].

Para que seja possível realizar todas as fases acima descritas, primeiramente foi necessário criar uma função Func no software MatLab. A função Func será a Fitnessfcn do AG, o volume de água necessário diariamente é de $95 m^3$, sendo assim todas as soluções apresentadas têm de satisfazer essa necessidade, para isso foi definida a condição bombagem (restrição) maior ou igual a $95 m^3$ ($b \geq 95$), a qual todas as soluções terão de respeitar. Sendo assim o capacidade dos reservatórios deve ser suficiente para armazenar a água bombeada.

Analisando as 100 soluções encontradas pelo AG, é possível observar na Tabela 46 que apenas 14 soluções são diferentes, ou seja, as restantes soluções são repetições dessas soluções. Algumas repetem um maior número de vezes e outras não, algumas apresentam o mesmo orçamento, mas têm uma pequena diferença na sua formação. A solução considerada ótima, repetiu 12 vezes entre as 100 soluções, apresentou o menor orçamento e, por isso, foi considerada como sendo a melhor solução. A solução consiste em dois furos de 100 m de profundidade com volume de bombagem diária de $50 m^3$ o tipo de revestimento é *open hole* ligados a um reservatório com $100 m^3$ de capacidade de armazenamento, a solução apresenta um orçamento total de 27 286,36 €.

A segunda solução na qual repetiu 27 vezes na última população é aproximada à da solução ótima, apresenta um orçamento maior, 28 746,36€. A solução consiste em dois

furos *open hole* de 100 m de profundidade com um volume de bombagem diária de 50 m^3 de água cada furo, os dois furos estão ligados a dois reservatórios com 4 e 100 m^3 de capacidade de armazenamento, sendo essa a única diferença a nível de configuração do sistema entre as duas soluções. Visto que um reservatório de 100 m^3 é suficiente para garantir o armazenamento da água bombeada pelos dois furos, pode-se dizer que a segunda solução se encontra sobredimensionada. A terceira solução mais barata, na qual repete 6 vezes com um orçamento de 28 964,63€, consiste em dois furos *open hole* com 100 e 200 m de profundidade cada um, possuem um volume de bombagem diária de 50 m^3 de água e estão ligados a um único reservatório de 100 m^3 de capacidade. Entretanto existem outras soluções que se repetem com mais frequência, porém são mais dispendiosas. A solução repete um total de 19 vezes e consiste em três furos, todos *open hole* e com 100 m de profundidade cada furo, um volume de bombagem diária de 20 30 e 50 m^3 de água cada um, ligados a dois reservatório de 4 e 100 m^3 , o orçamento da solução é de 38 137,08 €.

Analisando as soluções, a maioria apresenta a mesma profundidade e o tipo de revestimento dos furos, entre as 14 soluções 8 utilizam exclusivamente o furo com 100 m de profundidade, já as 6 soluções restantes combinam furos de 100 e 200 m de profundidade, o furo com 150 m de profundidade não é considerado em nenhuma das soluções. A nível de revestimento os furos *open hole* são utilizados exclusivamente em 11 soluções, já as 3 soluções restantes utilizam o revestimento *open hole* e com revestimento de maciço filtrante, uma vez que são 14 soluções únicas o tipo de furo sem revestimento de maciço filtrante não foi considerado em nenhuma das soluções. Este cenário acontece porque como foi observado no dimensionamento dos furos, os furos com revestimentos *open hole* e com revestimento de maciço filtrante mostraram ser os mais acessíveis, já os furos com revestimento de maciço filtrante mostrou ser o mais dispendioso de todos, por isso, não foi considerado em nenhuma das soluções.

O aumento da profundidade do furo implica no aumento do orçamento requerido para a construção dos mesmos e uma vez que o objetivo é encontrar a solução mais económica, justifica-se a escolha do furo com 100 m de profundidade com revestimento *open hole* em quase todas as soluções. O número de furos assim como o número de reservatórios e as suas capacidades de armazenamento, é um fator que também influencia no orçamento final. Entre as 14 soluções possíveis 8 utilizam dois furos, as outras 6 soluções utilizam 3

furos. As soluções com mais furos não necessitam necessariamente de mais reservatórios, mas sim reservatórios com maiores capacidades de armazenamento. Por isso, entre as 8 soluções que utilizam 3 furos, 4 soluções utilizam 3 reservatórios, sendo essas soluções as mais dispendiosas com 38 137,08 €, 39 818,35 €, 40 105,76 € e 41 089,76 €. Assim, o orçamento das 14 soluções varia consoante o número de furos utilizados, a profundidade dos mesmos, o tipo de revestimento, o número e a capacidade do reservatório escolhidos. A solução encontrada com o maior orçamento foi de 41 089,76 €, a solução consiste em 3 furos *open hole* com 100 m de profundidade, sendo 2 furos com um volume de bombagem diária de 50 m³ de água, ligados a um reservatório de 100 m³ de capacidade e 1 furo com um volume de bombagem diária de 20 m³ de água ligado a dois reservatórios com 4 e 16 m³ de capacidade cada um.

A solução classificada como sendo o centro das soluções que separa as soluções mais baratas das mais caras ou simplesmente a mediana, possui um orçamento de 33 297,08 €. Para entender melhor a dispersão dos orçamentos sobre a média das soluções, que foi de 33 985,34 €, recorreu-se ao desvio padrão das mesmas, na qual o valor encontrado foi de 4 748,64 €, isso mostra que os orçamentos das soluções não se concentram ao redor da média, mas sim são soluções diversificadas e distribuídas em torno da mesma.

A falta de conhecimento das características do aquífero do local do projeto, torna necessário identificar não só uma única solução ótima, é necessário identificar outras soluções para os diferentes cenários a nível de tipos de aquíferos. A primeira solução definida como a solução ótima do projeto, destina-se a aquíferos onde é possível a construção de furos com revestimento *open hole*, para um cenário diferente necessita-se de uma outra solução. Sendo assim para aquíferos onde é possível a instalação de furos com revestimento de maciço filtrante e *open hole* a solução considerada ótima tem um orçamento de 27 286,36 €. Num cenário onde só é possível a construção de três furos com capacidades diferentes, a melhor solução seria 3 furos de 20, 30 e 50 m³ de capacidade de bombagem, com 100 m de profundidade e revestimento *open hole*, ligados a um reservatório de 100 m³ de capacidade. O orçamento total é de 36 677,08 €.

Tabela 46 - Soluções encontradas através do AG e as suas características.

Soluções	Orçamento das Soluções	Nº de repetições	Nº de furos	Profundidade (m)	Volume m ³	Revestimento	Reservatório m ³
1	27 286,36	12	2	100/100	50/50	OH/OH	100
2	28 746,36	27	2	100/100	50/50	OH/OH	4/100
3	28 964,63	6	2	100/200	50/50	OH/OH	100
4	29 067,08	3	2	100/100	50/50	CR/OH	100
5	30 424,63	11	2	100/200	50/50	OH/OH	4/100
6	30 527,08	4	2	100/100	50/50	CR/OH	4/100
7	32 102,90	1	2	200/200	50/50	OH/OH	100
8	34 492,35	1	2	200/200	50/50	CR/OH	4/100
9	36 677,08	8	3	100/100/100	20/30/50	OH/OH/OH	100
10	38 137,08	19	3	100/100/100	20/30/50	OH/OH/OH	4/100
11	38 355,35	1	3	100/100/200	20/50/30	OH/OH/OH	100
12	39 818,35	1	3	100/100/200	20/50/30	OH/OH/OH	4/100
13	40 105,76	5	3	100/100/100	20/50/50	OH/OH/OH	25/100
14	41 089,76	1	3	100/100/100	20/50/50	OH/OH/OH	4/16/100
Total de soluções		100					

A otimização do projeto permitiu uma diminuição no orçamento, em relação a solução encontrada sem recorrer ao AG, para furos com revestimento *open hole*, a poupança foi na ordem de 11 944,60 €.

4.4. Impactos

A interação dos usuários com o projeto, ajuda a compreender melhor a situação da comunidade, uma vez que a população local é extremamente familiarizada com a cultura e as práticas locais. Por isso a implementação de metodologias participativas, permite uma maior aceitação por parte da população local, o que maximiza tanto os impactos sociais como os impactos económicos [10].

4.4.1. Impacto Social

O SBFV está diretamente envolvido com a comunidade local. A tecnologia deve ter características de adaptação adequadas para se encaixar no ambiente [10]. A aceitação da tecnologia na comunidade, associada a produtividade permite: melhorar a qualidade da população, através do aumento da produtividade agrícola e da variedade de alimentos, que permitem uma maior segurança alimentar.

A população da zona rural em Cabo Verde, vive principalmente da agricultura, as limitações sobre o seu desenvolvimento emprega uma grande desigualdade social, quando comparada com a população das zonas urbanas. A melhoria na qualidade de vida contribui diretamente na diminuição da desigualdade social, o que implica de certa forma na diminuição do despovoamento rural. Essa melhoria, pode ter uma série de benefícios potenciais, que vão desde o aumento da saúde física e mental até a melhoria da educação e da coesão social.

4.4.2. Impacto Económico

A implementação de projetos de SBFV, impacta economicamente a população beneficiada, diretamente e indiretamente. Para um maior impacto do projeto na localidade, é imprescindível a empregabilidade de habilidades, recursos materiais e recursos financeiros locais. Este cenário permite a valorização do produto interno e da mão de obra; o desenvolvimento do sector responsável pelo serviço e a criação de postos de trabalhos. Contribuindo para o desenvolvimento da zona rural.

As incertezas relacionadas com a garantia de disponibilidade de água, em quantidade e qualidade e com segurança, impede o desenvolvimento do sector agrícola. Os SBFV garantem o abastecimento de água durante o ano todo, o que garante a produtividade para todo o tipo de plantação em qualquer época do ano, diminuindo os riscos de perdas das plantações, essa garantia também permite uma maior segurança por parte do agricultor em experimentar diferentes plantações. Esses impactos afetam diretamente o rendimento do agricultor, isto porque a melhoria na produtividade e variedade de produtos, possibilita um aumento na renda e na sua estabilidade ao longo do ano. Em virtude do aumento do período de cultivo e a oferta de novos produtos, os comerciantes também são impactados, devido ao aumento e a variedade de clientes, assim como a estabilidade do rendimento.

O desenvolvimento no sector agrícola afeta diretamente a comunidade do meio rural; contribui para a segurança alimentar do país; garante uma variedade de produtos e uma possível diminuição na importação de determinados produtos. O que permite a valorização do produto nacional; o desenvolvimento de diferentes sectores ligados a agricultura e de modo geral contribui para o desenvolvimento do país.

Capítulo 5

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

O último capítulo, apresenta as conclusões sobre o projeto dimensionado para a zona agrícola de Santa Cruz, Cabo Verde, em comparação com alguns estudos apresentados no estado da arte. Na segunda parte é apresentada as sugestões para os trabalhos futuros, visando a maior confiabilidade do projeto desenvolvido.

5.1. Conclusões

Primeiramente, todo o dimensionamento do sistema foi realizado com conhecimento quase nulo sobre a localidade de Santa Cruz. No entanto o dimensionamento foi realizado para a situação em que a relação procura/oferta de energia, corresponde a situação em que é necessário maior número de painéis fotovoltaicos, no caso o mês de dezembro, como mostra Tabela 17 que contém a Irradiação Solar Mensal em kWh/m^2 . Assim o sistema será capaz de garantir a satisfação energética no pior cenário de radiação, já num cenário diferente haverá uma sobreprodução do sistema, que pode ser aproveitado para outras finalidades, como abastecimento animal.

A avaliação da necessidade de água desempenha um papel fundamental no projeto, nomeadamente na identificação do número de painéis fotovoltaicos, unidades de bombeamento e sistemas de irrigação. Além disso, a avaliação das necessidades hídricas das culturas é significativa para garantir uma gestão sustentável e eficiente dos recursos hídricos, uma vez que a necessidade hídrica não pode exceder os recursos hídricos disponíveis. A necessidade de água para todo o ciclo da cultura está estritamente ligada às condições climáticas do local, especialmente a humidade do ar, a temperatura ambiente, a radiação solar, a velocidade do vento e a precipitação [28]. De acordo com a [34] a necessidade hídrica total obtida para os cultivos presente na área do projeto é de aproximadamente $95 m^3$ para 2 ha. Na análise entre o presente projeto e o projeto desenvolvido pelo autor Cuadros [22], cujo SBFV de $6 kW_p$ foi suficiente para fornecer os requisitos de irrigação da área de 10 ha de um pomar de oliveiras na Espanha, fornecendo um caudal de $161 m^3$ por dia, o presente projeto mostra estar

sobredimensionado, visto que é necessário $13 kW_p$ para cumprir os requisitos de irrigação da área de 2 ha, fornecendo um caudal total de $100 m^3$.

A inclusão da população local no conhecimento do projeto é um fator importante para a viabilidade do sistema, assim como os demais apresentados. A população local é extremamente familiarizada com a cultura e as práticas locais, o que as tornam capazes de determinar as suas próprias necessidades, o que garante a melhor projeção do SBFV para máxima satisfação das necessidades. A especialização das pessoas e o uso de equipamentos a nível local, também é uma ótima resposta de garantia de viabilidade. Visto que a própria comunidade, será capaz de identificar e avaliar possíveis avarias no sistema, o que pode aumentar o seu tempo de vida útil, diminuir os custos de manutenção do projeto e consequentemente aumentar a viabilidade do sistema. É possível que ocorra um maior bombeamento de água nos meses cuja radiação é maior, logo a oferta será maior que a procura. Esse excesso de produção pode ser utilizado para irrigar mais áreas durante esse período, o que aumenta a produtividade dos agricultores, o desempenho do sistema, que diminui o tempo de retorno do investimento inicial.

O uso de água na irrigação, é de vital importância para o desenvolvimento das regiões rurais que dependem da atividade agrícola. A escassez de água reduz a capacidade de produção dos campos agrícolas e a possibilidade de mudança de produção para cultivos com melhores valores no mercado. O SBFV mostra ser uma tecnologia viável e segura para o fornecimento de água para irrigação em inúmeras regiões do globo. Uma vez que Cabo Verde, apresenta um forte potencial para desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos, os SBFV mostra ser uma solução viável para fazer face a problemática da falta de precipitação no país.

A melhor solução encontrada tem um orçamento de 27 286,36 e consiste em dois furos de 100 m de profundidade com volume de bombagem diária de $50 m^3$ o tipo de revestimento é *open hole* ligados a um reservatório com $100 m^3$ de capacidade de armazenamento.

5.2. Trabalhos Futuros

O presente trabalho, tem como principal objetivo estudar o uso da energia solar para bombeamento de água para agricultura, em áreas consideradas primordiais para o desenvolvimento da mesma em Cabo Verde. Neste contexto espera-se que futuramente e no seguimento deste trabalho, que os estudos realizados permitam garantir uma maior confiabilidade para o projeto desenvolvido. Sendo assim, para os trabalhos futuros, um estudo das necessidades das culturas a partir da evapotranspiração das mesmas, permitiria conhecer as necessidades reais das culturas no local, o que permite um dimensionando com maior precisão dos sistemas, tendo menores riscos de sobredimensionamento, o que garante uma maior confiabilidade ao projeto.

A modelação da resposta do aquífero, para a operação do SBFV é de significativa importância para prever o rebaixamento do nível da água no poço em comparação com o nível estático de água [28]. A realização de estudos hidrogeológicos e geofísicos para obter o máximo de informações do local, permitirá um melhor dimensionamento da captação, pois permite definir o método de furação a ser utilizado, os diâmetros e a profundidade da perfuração e os materiais necessários, o que determina o investimento real da captação.

Alguns softwares permitem a avaliação da viabilidade económica, contabilizam a variação nos custos da tecnologia e a potência do recurso da energia. A análise dos sistemas através desses softwares permitem conhecer o comportamento do SFV, recorrendo as condições climáticas do local, o que permite conhecer a produtividade, o desempenho e o custo do sistema no seu campo de atuação. O que torna o projeto mais confiável, sendo assim para trabalhos futuros são sugeridos esses softwares, assim como o PVsystem.

Para tornar o projeto mais acessível, uma solução usada atualmente para ter poucos módulos e tensão altas, é o uso do boost. Já existem no mercado CF com circuito boost. Estes circuitos elevam a tensão DC e são muito eficientes. O uso de CF com MPP também é uma solução.

Como trabalhos futuros poderão ser explorados outros métodos de otimização ou a elaboração de um software para a indicação automática de soluções de dimensionamento de acordo com as condições da área de implementação das culturas.

Referências Bibliográficas

- [1] J. Tavares, M. Lopes e F. Neto, “Energy Reports,” *Climate and fundamentals of the energy offer in Cape Verde*, vol. 6, pp. 370-377, Fevereiro 2020.
- [2] Portugues na Íntegra, “Países que falam língua portuguesa,” 6 Abril 2014. [Online]. Available: <http://portuguesnaintegra.blogspot.com/2014/04/paises-que-falam-lingua-portuguesa-cabo.html>. [Acedido em Novembro 2020].
- [3] M. Murteira e A. T. Abreu, ““A agricultura no desenvolvimento sócio-económico de cabo verde”,” CEA - Centro de Estudos Africanos, Lisboa, 1990.
- [4] Sweet, “Cabo Verde,” [Online]. Available: <http://sweet.ua.pt/isl/Cabo%20Verde.htm>. [Acedido em Novembro 2020].
- [5] S. Shahidian, R. Serralheiro, J. Serrano e A. Sousa, ““O desafio dos recursos hídricos em Cabo Verde”,” ISA-Press, 2015.
- [6] University of Arizona- Center Office of Arid Lands Studies, Draft Environmental Report on Cape Verde, Tucson, Arizona, 1980.
- [7] P. M. Ferreira, ““A Coerência das Políticas para o Desenvolvimento: Um instrumento em prol do desenvolvimento”,” *OpenEdition*, pp. 31-63, 2017.
- [8] A. d. M. Gomes e A. F. L. Pina, ““Problemas de Recursos Hídricos em ilhas, exemplo da ilha de Santiago”.
- [9] I. Odeh, Y. G. Yohanis e B. Norton, “Solar Energy,” *Economic viability of photovoltaic water pumping systems*, vol. 80, pp. 850-860, Julho 2006.
- [10] K. Meah, S. Ula e S. Barrett, “Renewable and Sustainable Energy Reviews,” *Solar photovoltaic water pumping—opportunities and challenges*, vol. 12, pp. 1162-1175, Maio 2008.

- [11] F. K. M. A. Louai Nabila, ““Design of photovoltaic pumping system using water tank storage for a remote area in Algeria”,” em *The fifth International Renewable Energy Congress IREC*, Hammamet, Tunisia, 2014.
- [12] M. Aliyu, G. Hassan, S. A. Said, M. U. Siddiqui, A. T. Alawami e I. M. Elamin, “Renewable and Sustainable Energy Reviews,” *“A review of solar-powered water pumping systems”*, vol. 87, Maio 2018.
- [13] “Renewable and Sustainable Energy Reviews,” *“Solar photovoltaic water pumping-opportunities and challenges”*, vol. 12, pp. 1162-1175, Maio 2008.
- [14] S. S. Chandel, M. N. Naik e R. Chandel, “Renewable and Sustainable Energy Reviews,” *“Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies”*, vol. 49, pp. 1084-1099, Setembro 2015.
- [15] V. C. Sontake e V. R. Kalamkarb, “Renewable and Sustainable Energy Reviews,” *“Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive review”*, vol. 59, pp. 1038-1067, Junho 2016.
- [16] A. Allouhi, M. S. Buker, H. El-houari, A. Boharb, M. B. Amine, T. Kousksou e A. Jamil, “Renewable Energy,” *“PV water pumping systems for domestic uses in remote areas: Sizing process, simulation and economic evaluation”*, vol. 132, pp. 798-812, Março 2019.
- [17] N. D. Kaushika e A. K. Rai, “Energy,” *“An investigation of mismatch losses in solar photovoltaic cell networks”*, vol. 32, pp. 755-759, Maio 2007.
- [18] N. Argaw, “Otimização de bombas de água fotovoltaicas acopladas a um dispositivo de condicionamento de energia de inversor DC / AC modulado por largura de pulso de interface,” em *Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)*, Waikoloa, HI, 1994.

- [19] C. A. e. J. Moncef, "Modelling and simulation of a PV-inverter-asynchronous motor association in photovoltaic pumping systems," em *Powering Beyond 2001*, Halifax, NS, Canada, 2001.
- [20] A. I. o. o. panelViorelBadescu, "Renewable Energy," "*Time dependent model of a complex PV water pumping system*", vol. 28, pp. 543-560, Abril 2003.
- [21] P. C. Pande, A. K. Singh, S. Ansari, S. K. Vyas e B. K. Dave, "Renewable Energy," "*Design development and testing of a solar PV pump based drip system for orchards*", vol. 28, pp. 385-396, Março 2003.
- [22] F. Cuadros, F. L. Rodríguez, A. Marcos e J. Coello, "Solar Energy," "*A procedure to size solar-powered irrigation (photoirrigation) schemes*", vol. 76, pp. 465-473, Maio 2004.
- [23] A. Hamidat e B. Benyoucef, "Renewable Energy," "*Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems*", vol. 33, pp. 933-942, Maio 2008.
- [24] N. Hamrouni, M. Jraidi e A. Chérif, "Solar Energy," "*Theoretical and experimental analysis of the behaviour of a photovoltaic pumping system*", vol. 83, pp. 1335-1344, Agosto 2009.
- [25] A. Mokeddem, A. Midoun, D. Kadric, S. Hiadsi e I. A. Raja, "Energy Conversion and Management," "*Performance of a directly-coupled PV water pumping system*", vol. 52, n° 10, pp. 3089-3095, Setembro 2011.
- [26] A. Tayebi, M. Brahami, M. Yaichi e B. Abdelkader, "Design and Implementation of SVM for Three Phase Inverter Fed an Induction Motor for Photovoltaic Stand-alone Pumping System," em *2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Agadir, Morocco, Morocco, 2019.
- [27] R. Shaik, N. Beemkumar, H. Adharsha, K. Venkadeshwaran e A. D. Dhassb, "*Efficiency enhancement in a PV operated solar pump by effective design of VFD and tracking system*", 4 Junho 2020.

- [28] P. E. Campana, H. Li, J. Zhang, R. Zhang, J. Liu e J. Yan, “Energy Conversion and Management,” *Economic optimization of photovoltaic water pumping systems for irrigation*, pp. 32-41, Maio 2015.
- [29] G. Merei, C. Bergera e D. U. Sauer, “Solar Energy,” *Optimization of an off-grid hybrid PV–Wind–Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm*, vol. 97, pp. 460-473, Novembro 2013.
- [30] M. Jamil, A. S. Anees e M. Rizwan, “American Journal of Electrical Power and Energy Systems,” *SPV based water pumping system for an academic institution*, vol. 1, n° 1, pp. 1-7, 30 Dezembro 2012.
- [31] P. Purohit e T. C. Kandpal, “Solar photovoltaic water pumping in India: a financial evaluation,” *International Journal of Ambient Energy*, vol. 26, n° 3, pp. 135-146, Julho 2005.
- [32] T. D. P, “Energia Solar,” *Breaking the mould: solar water pumping-the challenges and the reality*, vol. 75, pp. 1-9, Julho 2003.
- [33] M.Abu-Aligah, “Design of Photovoltaic Water Pumping System and Compare it with Diesel Powered Pump,” *JJMIE- Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 5, n° 3, pp. 273 - 280, Junho 2011.
- [34] M. A. G. João Tavares Pinho, "Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos", Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [35] R. Rawat, S. C. Kaushik e R. Lamba, “Renewable and Sustainable Energy Reviews,” *A review on modeling, design methodology and size optimization of photovoltaic based water pumping, standalone and grid connected system*, vol. 57, pp. 1506-1519, Maio 2016.
- [36] B. D.Vick e R. NolanClark, “Solar Energy,” *Experimental investigation of solar powered diaphragm and helical pumps*, vol. 85, n° 5, pp. 945-954, Maio 2011.

- [37] R. Valer, ““Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento com Conversores de Frequência e Motobombas de fabricação nacional: Avaliação e Orientações para sua implantação”,” São Paulo, 2016.
- [38] P. Elia, C. H. Li e J. Yan, “Applied Energy,” *Dynamic modelling of a PV pumping system with special consideration on water demand*, vol. 112, pp. 635-645, Dezembro 2013.
- [39] S. A. Kalogirou, “Solar Energy Engineering (Second Edition),” *Chapter 9 - Photovoltaic Systems*, pp. 481-540, 2014.
- [40] A. Hamidat, “Renewable Energy,” *Simulation of the performance and cost calculations of the surface pump*, vol. 18, pp. 383-392, Novembro 1999.
- [41] B. K. Bose, “ISIE 93 - Budapest: IEEE International Symposium on Industrial Electronics Conference Proceedings,” *Variable frequency drives-technology and applications*, pp. 1-18, 1993.
- [42] ABB, Manual do utilizador- Conversores de frequência ACS355, ABB Oy, 2018.
- [43] A. Mendes, ““Análise Económica de quatro explorações Agrícolas na Ilha de Santiago – Cabo Verde”,” 2020.
- [44] A. Hamidat, B. Benyoucef e T. Hartani, “Renewable Energy,” *Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions*, vol. 28, nº 7, pp. 1081-1096, Junho 2003.
- [45] E. Kellner, J. Akutsu e L. F. R. Reis, “Engenharia Sanitaria e Ambiental,” *Avaliação da rugosidade relativa dos tubos de PVC com vistas ao dimensionamento das redes de distribuição de água*, vol. 21, nº 2, 2016.
- [46] “EU SCIENCE HUB,” 8 Maio 2020. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>. [Acedido em 6 Agosto 2020].
- [47] F. A. d. S. Pereira e M. Â. S. d. Oliveira, Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica, vol. 2º, Publindústria, Edições Técnicas, 2015, pp. 202-203.

- [48] M. A. G. João Tavares Pinho, "Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos", Rio de Janeiro, 2014.
- [49] Hager, S.A, "Disjuntores Magnetotermicos," [Online]. Available: <https://www.hager.pt/catalogo-de-produtos/distribuicao-de-energia/proteccao/disjuntores-magnetotermicos/6-10-ka-3p-3m/nft320/14083.htm>. [Acedido em Setembro 2020].
- [50] Sistemas e Condutores S.A, "Ficha Tecnica Cabo Solar PV Fotovoltaico," [Online]. Available: http://www.scondutores.pt/datasheets/PT/Ficha_Tecnica_Cabo_Solar_PV_Fotovoltaico.pdf. [Acedido em Outubro 2020].
- [51] BELDEN, "Catálogo," [Online]. Available: https://catalog.belden.com/index.cfm?event=pd&p=PF_29504. [Acedido em Outubro 2020].
- [52] BELDEN, "Catálogo," [Online]. Available: https://catalog.belden.com/techdata/EN/29503_techdata.pdf. [Acedido em Outubro 2020].
- [53] A. A. C. Mota, "'Dimensionamento e execução de captações de águas subterrâneas",' 2018.
- [54] Suministros del Sol, "photovoltaic-panels," GREEN ELECTRONIC COMPONENTS SL, [Online]. Available: <https://suministrosdelsol.com/en/photovoltaic-panels/885-akcome-solar-panel-SK6612P.html>. [Acedido em Outubro 2020].
- [55] GRUNDFOS, "Product Center," [Online]. Available: <https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?custid=GMA&productnumber=98699201&qcid=1145852921>. [Acedido em Setembro 2020].

- [56] ABB, “ACS55,” [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/2cbd97b880964fd589bdeb09c4b5484c/Tabela%20Precos%20Drives%20AC.pdf>. [Acedido em Outubro 2020].
- [57] Tangou, “Produtos,” [Online]. Available: https://pt.grandado.com/products/2-polo-32a-6ka-dc-mcb-disjuntor-para-a-energia-solar-fotovoltaica-alta-qualidade?variant=22007161946230¤cy=EUR&gclid=CjwKCAiAzNj9BRBDEiwAPsL0dzMCPKaAcyzeABfV3AH7KReMzO7Day0NFKfkDnmKZbqB_7nMk1MuHxoCJugQAvD_BwE. [Acedido em Julho 2020].
- [58] EfectoLED, “Cabo Unifilar,” [Online]. Available: <https://www.efectoled.com/pt/comprar-cabo-unifilar/7259-cable-rojo-6mm2-pv-zz-f-.html>. [Acedido em Setembro 2020].
- [59] EfectoLED, “Cabo Unifilar,” [Online]. Available: <https://www.efectoled.com/pt/comprar-cabo-unifilar/7258-cable-negro-solar-zz-f-10mm2.html>. [Acedido em Julho 2020].
- [60] BELDEN, Cabling Solutions for Industrial Applications, U.S.A, 2013.
- [61] T. S. P. Biscontini, Compositor, *Genetic algorithm (GA)*. [Gravação Sonora]. Salem Press, Inc., A Division of EBSCO Information Services, Inc.. 2017.

Apêndice

Apêndice A: Ficheiro MatLab (Função Func)

```
%Configuração dos Furos
%
%Retorna o valor total do orçamento para os 3 Furos nos
diferentes cenarios
%
%
function [y] = Func(x)

%CALCULO CONSIDERANDO A CAPACIDADE DO FURO

cap20=4564.96;
cap30=4817.06;
cap50=5620.74;

for i=4:6
    if x(i)==1
        orc=orc+cap20;
    elseif x(i)==2
        orc=orc+cap30;
    elseif x(i)==3
        orc=orc+cap50;
    end
end

%CALCULO CONSIDERANDO O REVESTIMENTO DO FURO

furoOH1=2843.44;
furoOH2=3927.05;
furoOH3=5571.71;

furoSR1=3724.66;
furoSR2=5343.16;
furoSR3=6986.66;

furoCR1=4624.16;
furoCR2=6542.66;
furoCR3=8411.16;
```

```

for i=7:9
    if x(i)==1 && x(i-6)==1
        orc=orc+furoOH1;
    elseif x(i)==1 && x(i-6)==2
        orc=orc+furoOH2;
    elseif x(i)==1 && x(i-6)==3
        orc=orc+furoOH3;
    elseif x(i)==2 && x(i-6)==1
        orc=orc+furoSR1;
    elseif x(i)==2 && x(i-6)==2
        orc=orc+furoSR2;
    elseif x(i)==2 && x(i-6)==3
        orc=orc+furoSR3;
    elseif x(i)==3 && x(i-6)==1
        orc=orc+furoCR1;
    elseif x(i)==3 && x(i-6)==2
        orc=orc+furoCR2;
    elseif x(i)==3 && x(i-6)==3
        orc=orc+furoCR3;
    end
end

%CALCULO CONSIDERANDO O RESERVATORIO DO FURO

r4m3=1460;
r16m3=2149;
r22m3=3001;
r25m3=2625;
r32m3=3190;
r54m3=3915;
r100m3=4786;

for i=10:15
    if x(i)==1
        orc=orc+r4m3;
    elseif x(i)==2
        orc=orc+r16m3;
    elseif x(i)==3
        orc=orc+r22m3;
    elseif x(i)==4
        orc=orc+r25m3;
    elseif x(i)==5
        orc=orc+r32m3;
    elseif x(i)==6
        orc=orc+r54m3;
    elseif x(i)==7
        orc=orc+r100m3;
    end
end
y=orc;

%fprintf('%8.4f\n',y)

```

Apêndice A: Ficheiro MatLab (Função AG)

```
%
clc,clear, close all
%
%
% OPTIMIZATION PROBLEM FOR GENETIC ALGORITHM
%
solver='ga';
fitnessfcn=@(x)Func;
nvars=15;

%%
IntCon =[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15]; %padrão
A=[];
b=[];
Aeq = [];
beq = [];
lb = [1 1 0 1 1 0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 ];
ub = [3 3 3 3 3 3 3 3 3 7 7 7 7 7 7 ];

runs=100;
Nvariaveis=15;

for i=1:runs
[x,fx] = ga(@Func,15,A,b,Aeq,beq,lb,ub,@nonlcon,IntCon);

inf(i,1)=fx;
inf(i,2:Nvariaveis+1)=x';

end
%fprintf ('%8.4f\n',x,fx)
[fmin,find]=min(inf(:,1))
```

Anexos

Anexo I- Painei Fotovoltaico SK6612P 330W

SK6612P 330/335/340W

ELECTRICAL PARAMETERS @ STC

Max. Power Output Pmax (W)	330	335	340
Power Tolerance	0~+3%	0~+3%	0~+3%
Max. Power Voltage Vmp (V)	37.1	37.3	37.7
Max. Power Current Imp (A)	8.89	8.98	9.02
Open Circuit Voltage Voc (V)	45.7	46.2	46.4
Short Circuit Current Isc (A)	9.38	9.47	9.51
Module Efficiency (%)	17.0	17.3	17.5

*STC (Standard Test Condition): Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass 1.5

ELECTRICAL PARAMETERS @ NOCT

Max. Power Output Pmax (W)	243.5	247.4	251.1
Max. Power Voltage Vmp (V)	34.35	34.60	34.89
Max. Power Current Imp (A)	7.09	7.15	7.20
Open Circuit Voltage Voc (V)	42.39	42.67	42.84
Short Circuit Current Isc (A)	7.61	7.66	7.69

*NOCT (Nominal Operating Cell Temperature): Irradiance 800W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s

TEMPERATURE COEFFICIENTS

Temperature Coefficients of Pmp	-0.40%/°C
Temperature Coefficients of Voc	-0.31%/°C
Temperature Coefficients of Isc	+0.055%/°C

MECHANICAL PARAMETERS

Cell Type	Poly 156.75x156.75mm
Number of Cells	72pcs(6x12)
Dimensions (L*W*H)	1957x992x40mm
Weight	22.5kg
Frame	Anodised Aluminum
Junction Box	IP67, 3 bypass diodes
Cable Length	4.0mm ² , 900mm

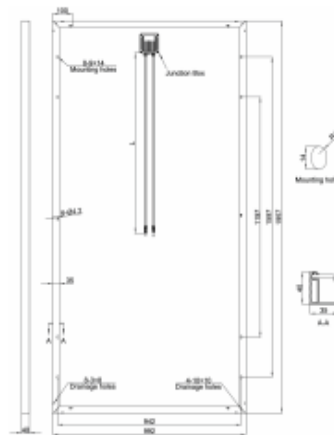
OPERATING CONDITION

Maximum System Voltage(V)	1000DC
Operating Temperature(°C)	-40~+85
Max. Wind Load / Snow Load(psa)	2400/5400
Max. Over Current(A)	15
Application Class	Class A
Fire Rating	Class C
NOCT(°C)	45±2

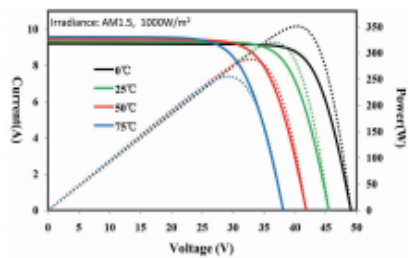
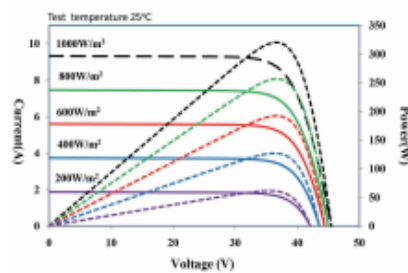
PACKAGE INFORMATION

Truck 9.6m / 13m / 17.5m	459 / 612 / 1257 pcs
Container 20'GP / 40'GP / 40'HQ	260 / 624 / 672 pcs
Quantity / Pallet	24 Truck / 26 / CTNR pcs

ASSEMBLY DRAWING (Unit : mm)



I-V CURVES / SK6612P-325



AKCOME OPTRONICS SCIENCE & TECHNOLOGY CO.,LTD.

Add: No.110 Jintang Road, Zhangjiagang economic and Technological Development Area, Jiangsu PR, China

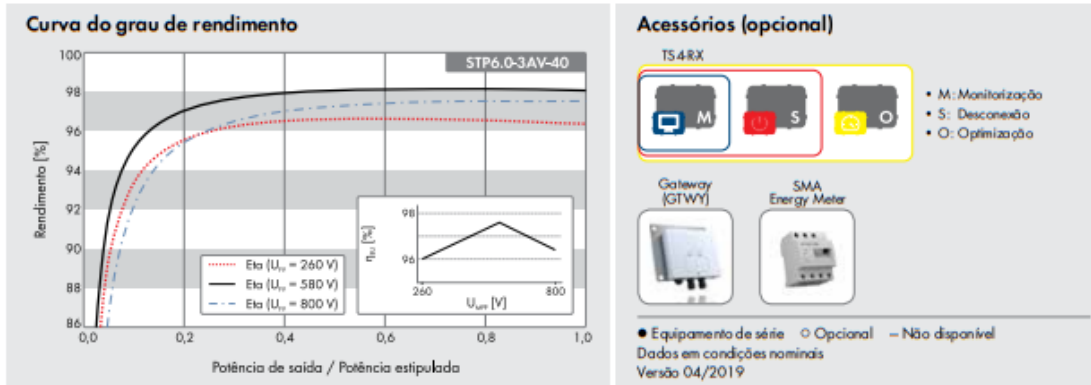
Tel: 400-101-7000

Email: modulesales@akcome.com

www.akoptronics.com




Anexo II- Inversor Sunny Tripower



Dados técnicos	Sunny Tripower 3.0	Sunny Tripower 4.0	Sunny Tripower 5.0	Sunny Tripower 6.0
Entrada (CC)				
Potência máx. do gerador fotovoltaico	6000 Wp	8000 Wp	9000 Wp	9000 Wp
Tensão máx. de entrada	850 V	850 V	850 V	850 V
Intervalo de tensão MPP	140 V a 800 V	175 V a 800 V	215 V a 800 V	260 V a 800 V
Tensão atribuída de entrada		580 V		
Tensão mín. de entrada/Tensão de entrada inicial		125 V/150 V		
Corrente máx. de entrada Entrada A/Entrada B		12 A/12 A		
Corrente máx. de curto-circuito Entrada A/Entrada B		18 A/18 A		
Número de entradas MPP independentes/strings por entrada MPP		2/A:1; B:1		
Saída (CA)				
Potência atribuída (com 230 V, 50 Hz)	3000 W	4000 W	5000 W	6000 W
Potência aparente CA máx.	3000 VA	4000 VA	5000 VA	6000 VA
Tensão nominal CA		3/N/PE; 220 V / 380 V 3/N/PE; 230 V / 400 V 3/N/PE; 240 V / 415 V		
Intervalo de tensão CA		180 V a 280 V		
Frequência de rede CA / intervalo		50 Hz / 45 Hz a 55 Hz 60 Hz / 55 Hz a 65 Hz		
Frequência de rede atribuída/tensão de rede atribuída		50 Hz/230 V		
Corrente máx. de saída	3 x 4,5 A	3 x 5,8 A	3 x 7,6 A	3 x 9,1 A
Fator de potência na potência atribuída / fator de desfasamento ajustável		1 / 0,8 sobrecarregado a 0,8 subexcitado		
Fases de injeção/fases de ligação		3 / 3		
Rendimento				
Rendimento máx./rend. europeu	98,2 % / 96,5 %	98,2 % / 97,1 %	98,2 % / 97,4 %	98,2 % / 97,6 %
Dispositivos de segurança				
Ponto de seccionamento no lado de entrada		●		
Monitorização da ligação à terra/monitorização da rede		● / ●		
Proteção contra inversão de polaridade CC/resistência a curto-circuitos CA/separação galvânica		● / ● / -		
Unidade de monitorização de corrente residual sensível a todas as correntes		●		
Classe de protecção (conforme a IEC 61140)/categoria de sobretensão (conforme a IEC 60664-1)		I/III		
Dados gerais				
Dimensões (L/A/P)		435 mm/470 mm/176 mm (17,1 inch/18,5 inch/6,9 inch)		
Peso		17 kg (37,4 lb)		
Faixa de temperatura de operação		-25 °C a +60 °C [-13 °F a +140 °F]		
Emissões sonoras, típicas		30 dB(A)		
Autoconsumo (inerte)		5,0 W		
Topologia / Cancela de refrigeração		Sem transformador / Convecção		
Grau de protecção (conforme a IEC 60529)		IP65		
Classe de condições ambientais (conforme a IEC 60721-3-4)		4K4H		
Valor máximo admissível da humidade relativa (sem condensação)		100 %		
Equipamento				
Ligação CC/ligação CA		SUNCLIX/ficha CA		
Visualização através de smartphone, tablet ou laptop		●		
Interfaces: WLAN / Ethernet / RS485		● / ● / ●		
Protocolo de comunicação		Modbus (SMA, Sunspec), Webconnect, SMA Data, TS4R		
Gestão de sombras: OptiTrac: Global Peak / TS4R		● / ○		
Garantia: 5/10/15 anos		● / ○ / ○		
Certificadas e homologações (mais a pedido)		AS 4777, C 10/11, CE, CEI 0-21, DIN EN 62109-1/IEC 62109-1, DIN EN 62109-2/IEC 62109-2, EN 50438, G 59/3, GB3/2, NEN-EN 50438, ÖVE / ÖNORM E 8001.4-712, PPDS, PPC, RD 1699, SI 4777, TR 3.2.1, UTE C15-712, VDE-ARN 4103, VDE0126-1-1, VFR 2014, RSG compliant		
Certificadas e homologações (em planeamento)		DEWA 2016, EN 62116, IEC 61727, IEC-EN 50438, NBR 16149, NRS 097-2-1		
Disponibilidade países SMA Smart Connected		AU, AT, BE, CH, DE, ES, FR, IT, LU, NL, UK		
Designação de modelo	STP3.0-3AV-40	STP4.0-3AV-40	STP5.0-3AV-40	STP6.0-3AV-40

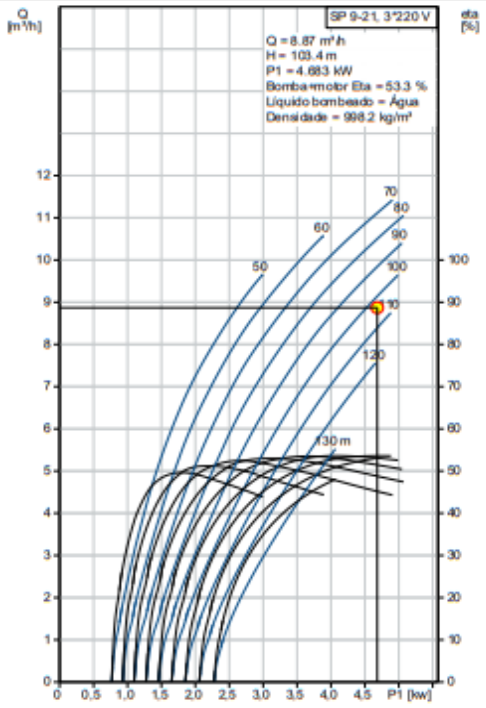
Anexo III- Conjunto Motobomba 9-21




Nome empresa:
Criado por:
Telefone:


Data: 18/09/2020

Descrição	Valor
Inf. geral:	
Designação do produto:	SP 9-21
Código::	A pedido
Número EAN::	A pedido
Preço:	EUR 2786
Técnicos:	
Velocidade da bomba na qual se baseiam os dados da mesma:	2900 rpm
Caudal nominal:	9 m ³ /h
Altura manométrica nominal:	110.8 m
Estágios:	21
Impulsor reduzido:	NONE
Empanque para o motor:	HW/CER
Homologações na chapa de características:	CE,GOST2
Tolerância da curva:	ISO9906:2012 3B
Modelo:	A
Válvula:	YES
Materiais:	
Bomba:	Aço inoxidável
Bomba:	EN 1.4301
Bomba:	AISI AISI 304
Impulsor:	Aço inoxidável
Impulsor:	EN 1.4301
Impulsor:	AISI AISI 304
Motor:	Aço inoxidável
Motor:	DIN W -Nr. 1.4301
Motor:	AISI 304
Instalação:	
Descarga da bomba:	Rp2
Diâmetro do motor:	4 inch
Líquido:	
Líquido bombeado:	Água
Maximum liquid temperature:	40 °C
Temp. máx. do líquido a 0,15 m/seg:	40 °C
Car. eléctricas:	
Tipo de motor:	MS4000
Aplicações do motor:	NEMA
Potência nominal - P2:	4 kW
Potência (P2) requerida pela bomba:	4 kW
Frequência da rede:	50 Hz
Tensão nominal:	3 x 220-230 V
Corrente nominal:	17.4-17.6 A
Corrente de arranque:	520-540 %
Cos phi - factor de potência:	0.80-0.77
Velocidade nominal:	2865-2875 rpm
Método de arranque:	Directo
Classe de protecção (IEC 34-5):	IP58
Classe de isolamento (IEC 85):	F
Protecção do motor:	NENHUM
Protecção térmica:	externo
Transmissor de temp. incorporado:	não
Motor n.º:	79104510
Outros:	
Índice de eficiência mínima MEI ≥:	0.70
Estado ErP:	EuP Autónomos/Prod.
Peso líquido:	38.1 kg
Peso bruto:	43.7 kg




SP 9-21, 3*220 V
 Q = 8.87 m³/h
 H = 103.4 m
 P1 = 4.893 kW
 Bomba+motor Eta = 53.3 %
 Líquido bombeado = Água
 Densidade = 998.2 kg/m³





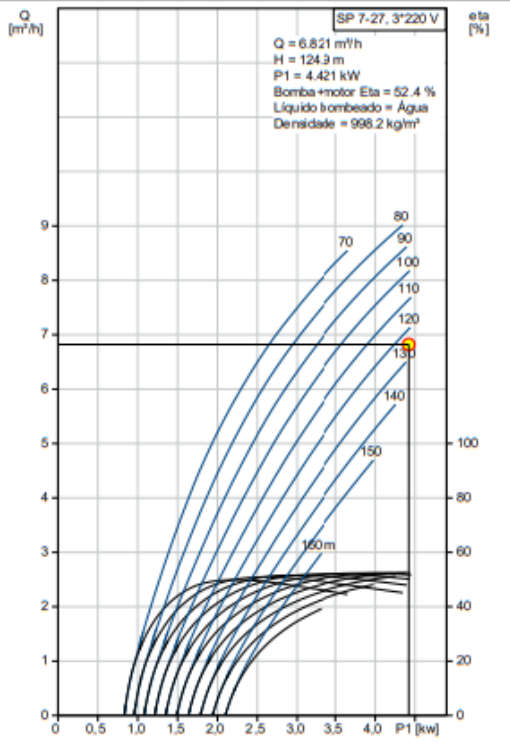
Anexo IV- Conjunto Motobomba 7-27




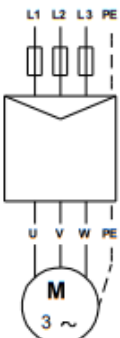
Nome empresa:
Criado por:
Telefone:

Data: 16/10/2020


Descrição	Valor
Inf. geral:	
Designação do produto:	SP 7-27
Código::	98699165
Número EAN::	5712600108134
Preço:	EUR 2578
Técnicos:	
Velocidade da bomba na qual se baseiam os dados da mesma:	2900 rpm
Caudal nominal:	7 m ³ /h
Altura manométrica nominal:	124 m
Diâmetro efectivo do impulsor:	0 mm
Estágios:	27
Impulsor reduzido:	NONE
Empanque para o motor:	HM/CER
Homologações na chapa de características:	CE, GOST2
Tolerância da curva:	ISO9906:2012 3B
Modelo:	A
Válvula:	YES
Materiais:	
Bomba:	Aço inoxidável
Bomba:	EN 1.4301
Bomba:	AISI AISI 304
Impulsor:	Aço inoxidável
Impulsor:	EN 1.4301
Impulsor:	AISI AISI 304
Motor:	Aço inoxidável
Motor:	DIN W.-Nr. 1.4301
Motor:	AISI 304
Instalação:	
Descarga da bomba:	Rp1 1/2
Diâmetro do motor:	4 inch
Líquido:	
Líquido bombeado:	Água
Maximum liquid temperature:	40 °C
Temp. máx. do líquido a 0,15 m/seg:	40 °C
Car. eléctricas:	
Tipo de motor:	MS4000
Aplicações do motor:	NEMA
Potência nominal - P2:	4 kW
Potência (P2) requerida pela bomba:	4 kW
Frequência da rede:	50 Hz
Tensão nominal:	3 x 220-230 V
Corrente nominal:	17,4-17,6 A
Corrente de arranque:	520-540 %
Cos phi - factor de potência:	0.80-0.77
Velocidade nominal:	2865-2875 rpm
Método de arranque:	Directo
Classe de protecção (IEC 34-5):	IP58
Classe de isolamento (IEC 85):	F
Protecção do motor:	NENHUM
Protecção térmica:	externo
Transmissor de temp. incorporado:	não
Motor n.º:	79104510
Outros:	
Índice de eficiência mínima MEI ≥:	0.70
Estado ErP:	EuP Autónomos/Prod.
Peso líquido:	41.6 kg







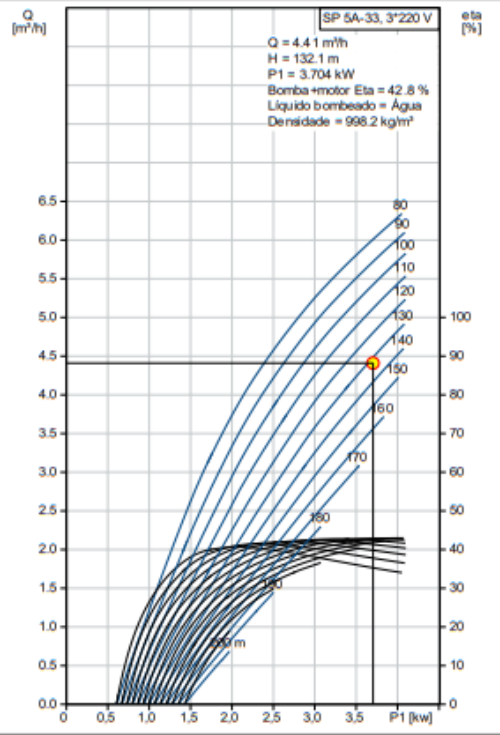
Anexo V- Conjunto Motobomba 5A-33



Nome empresa:
Criado por:
Telefone:

Data: 16/10/2020

Descrição	Valor
Inf. geral:	
Designação do produto:	SP 5A-33
Código::	05001A33
Número EAN::	5700391 118531
Preço:	EUR 1736
Técnicos:	
Velocidade da bomba na qual se baseiam os dados da mesma:	2900 rpm
Caudal nominal:	5 m ³ /h
Altura manométrica nominal:	135 m
Diâmetro efectivo do impulsor:	0 mm
Estágios:	33
Impulsor reduzido:	NONE
Empanque para o motor:	HM/CER
Homologações na chapa de características:	CE, EAC
Tolerância da curva:	ISO9906:2012 3B
Modelo:	A
Válvula:	YES
Versão do motor:	T40
Especificação da extremidade do veio:	SPLINE
Materiais:	
Bomba:	Aço inoxidável
Bomba:	EN 1.4301
Bomba:	AISI AISI 304
Impulsor:	Aço inoxidável
Impulsor:	EN 1.4301
Impulsor:	AISI AISI 304
Motor:	Aço inoxidável
Motor:	DIN W.-Nr. 1.4301
Motor:	AISI 304
Instalação:	
Descarga da bomba:	Rp1 1/2
Diâmetro do motor:	4 inch
Líquido:	
Líquido bombeado:	Água
Maximum liquid temperature:	40 °C
Temp. máx. do líquido a 0,15 m/seg:	40 °C
Car. eléctricas:	
Tipo de motor:	MS4000
Aplicações do motor:	GRUNDFOS
Potência nominal - P2:	3 kW
Potência (P2) requerida pela bomba:	3 kW
Frequência da rede:	50 Hz
Tensão nominal:	3 x 220-230 V
Corrente nominal:	14.2-14.6 A
Corrente de arranque:	480-490 %
Cos phi - factor de potência:	0.77-0.73
Velocidade nominal:	2865-2875 rpm
Método de arranque:	Directo
Classe de protecção (IEC 34-5):	IP68
Classe de isolamento (IEC 85):	F
Protecção do motor:	NENHUM
Protecção térmica:	externo
Transmissor de temp. incorporado:	não
Motor n.º:	79104508
Outros:	
Índice de eficiência mínima MEI ≥:	0.50



SP 5A-33, 3*220 V
 Q = 4.41 m³/h
 H = 132.1 m
 P1 = 3.704 kW
 Bomba+motor: Eta = 42.8 %
 Líquido bombeado = Água
 Densidade = 998.2 kg/m³

