

Rodrigo Delalibera Carvalho

**ASPECTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS EM SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA USANDO ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA E CAPTAÇÃO SUBTERRÂNEA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Ramon Lucas Dalsasso

Florianópolis

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

A ficha de identificação é elaborada pelo próprio autor
Maiores informações em:
<http://portalbu.ufsc.br/ficha>

Rodrigo Delalibera Carvalho

**ASPECTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS EM SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA USANDO ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA E CAPTAÇÃO SUBTERRÂNEA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre, e aprovado em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, x de xxxxx de 2016.

Prof. xxx, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. xxxx, Dr.
Orientador
Universidade xxxx

Prof. xxxx, Dr.
Corientador
Universidade xxxx

Prof. xxxx, Dr.
Universidade xxxxxx

Este trabalho é dedicado às pessoas desprovidas de acesso a água potável e às futuras gerações.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Grande Mistério, Universo, Deus pela vida.

À Gratidão, com o perdão do trocadilho, mas não há palavra e sentimento que possa sintetizar e expressar os momentos de plenitude e aprendizado ao longo desses últimos anos.

Aos meus pais por serem ótimos exemplos, e me fazerem equilibrar a razão e o coração em minhas decisões.

Aos meus sobrinhos por resgatarem a minha criança interior, a inocência e a pureza dos seres humanos, além de unir nossas famílias.

Ao meu irmão pelo apoio, liderança e conselhos de sempre.

À Bruna pelo alimento e por me mostrar o mais nobre dos sentimentos – o Amor.

Aos amigos Maurício e Pablo pela parceria e ajuda no trabalho.

Aos amigos Felipe Odreski, Lis, Delyra, Taiane, Igor, Louise e Seo Edgar, por me ajudarem na vida de nômade durante a temporada.

À Jaque pelos momentos de pura magia e conexão dos chacras superiores.

Ao Seo Aduci e D. Eliete por me proporcionarem viver em um Espaço Sagrado, desfrutar do cotidiano dos nativos, e me provar que “a simplicidade é o mais alto grau de sofisticação do ser humano”.

Ao meu orientador Ramon Lucas Dalsasso pela compreensão, paciência e supervisão no desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas de pesquisa Tiago Guedes, Joana Andreazza, Viviane Motta e Marcella Fortino.

Ao Seo Zé e família pela recepção e cordialidade em Orleans.

À CAPES, UFSC e PPGEA pelo suporte.

À força que guia minha vida, que vem de um lugar único, maravilhoso e muito acima de meu controle. Guiado por essa força, jamais desistirei daquilo em que realmente acredito: da minha missão de transformar minha vida em obra de arte viva, levando LUZ ao mundo e aos que me cercam.

“Permita-me ter a coragem necessária para enfrentar os inimigos interiores.

Honrando o guerreiro que ali existe
Sem nunca abandonar as minhas Curas
Nem o coração que bate em meu peito.”

“The real purpose of scientific method is to make sure Nature hasn’t mislead you into thinking you know something you don’t actually know.”

Robert. M. Pirsig, 2006.

RESUMO

A gestão dos recursos hídricos e energéticos são os principais desafios que a sociedade contemporânea enfrenta atualmente. Água e energia são fatores fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico das comunidades, principalmente aquelas situadas em locais remotos, e nesse cenário, a falta de energia é o aspecto mais preocupante. Os sistemas de bombeamento fotovoltaico apresentam vantagens para a inserção em comunidades isoladas, como fácil instalação e pouca manutenção durante o ciclo de vida, porém o dimensionamento inadequado pode gerar gastos desnecessários ou comprometer o abastecimento de água. Simular o desempenho favorece a concepção de sistemas, e permite alcançar a otimização técnica e econômica em projetos da referida tecnologia. O estudo propõe um método de simulação com a utilização do GRG (*Generalized Reduced Gradient*), dados regionais de radiação solar, de consumo de água, de produtividade de poços e capacidade do sistema de bombeamento, para obter a referida otimização. A verificação do respectivo método foi realizada em um sistema piloto, localizado em uma comunidade rural, no município de Orleans, Estado de Santa Catarina. A localidade apresenta uma das menores média de radiação anual no país, aproximadamente 4,5 kWh/m².dia. A simulação efetuada em cenário crítico de radiação solar, e com as configurações do sistema piloto apresentou diferença percentual de 0.98% menor em relação ao comportamento monitorado, quanto ao nível de água no reservatório, evidenciando assim a eficiência do método. O uso da ferramenta auxilia no processo de tomada de decisão quanto à concepção de projetos, além de beneficiar as comunidades com acesso à água e energia, trazendo benefícios em todas as esferas: social, ambiental e econômico.

Palavras-chave: bombeamento fotovoltaico, simulação de desempenho, otimização do dimensionamento.

ABSTRACT

The management of water and energy resources are the main challenges that contemporary society faces nowadays. Water and energy are fundamental factors for socio-economic development of the communities, especially those located in remote locations. In this case, the access to energy is the most critical aspect. Photovoltaic (PV) water pumping systems have advantages for insertion in isolated communities, such as easy installation and low maintenance during the life cycle. However, inappropriate sizing can increase costs or affect the water supply. Simulate the performance favors the system sizing and allows achieving the technical and economic optimization of the mentioned system. The study proposes a simulation method which uses the Generalized Reduced Gradient (GRG), solar radiation regional data, water consumption, wells productivity and photovoltaic water pumping system capacity, to obtain this optimization. The method was validated in a pilot system, located in a rural community in the city of Orleans, State of Santa Catarina, Brazil. The place has one of the lowest average annual radiation in the country, approximately 4.5 kWh / m².day. Under critical period and natural system conditions, the simulation results are in a very close agreement with 0.98% of the monitored behavior, demonstrating therefore the efficiency of the method. The proposed tool can assist the decision-making process on the design projects and benefit communities where access to water and energy is limited bringing benefits in all spheres: social, environmental and economic.

Keywords: photovoltaic water pump, performance simulation, optimal sizing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Radiação Solar Global no Brasil.	26
Figura 2: Sistema acoplado de bombeamento fotovoltaico.....	29
Figura 3: Dias com diferentes valores de horas de sol pleno.	31
Figura 4: Faixa dos sistemas de bombeamento fotovoltaico.....	32
Figura 5: Faixa de operação dos tipos de motobombas.	33
Figura 6: Localização da área de estudo.	41
Figura 7: Rio Belo, no entorno do sistema piloto.	44
Figura 8: Arranjo geral do sistema piloto.	44
Figura 9: Sistema piloto de bombeamento fotovoltaico.....	45
Figura 10: Medidores eletromagnéticos de vazão.....	46
Figura 11: Medidor de nível (levellogger).....	47
Figura 12: Pirânometro (à esquerda) e datalogger (à direita).....	47
Figura 13: Módulo solar Kyocera 250W.	48
Figura 14: Módulo Fotovoltaico, Driver e Bomba P100.	49
Figura 15: Radiação solar inclinada nos meses de inverno.....	51
Figura 16: Curvas de radiação de municípios em cada região.	52
Figura 17: Fator de radiação para regiões brasileiras.....	53
Figura 18: Custo do reservatório em função do volume.	55
Figura 19: Fluxograma de cálculo da capacidade do reservatório	59
Figura 20: Planilha de escolha preliminar do sistema para 50 pessoas e cenário 1.....	63
Figura 21: Planilha de custos do sistema com a otimização para 50 pessoas e cenário 1.	64
Figura 22: Gráfico de vazão e radiação em função do tempo.	68
Figura 23: Rendimento do conjunto hidro energético em função da radiação. ..	70
Figura 24: Gráfico de dispersão dos valores encontrados.	70
Figura 25: Nível de água no reservatório, previsto pelo método e medido.....	72
Figura 26: Simulação do volume remanescente para atendimento a 10 pessoas - cenário 1.	77
Figura 27: Simulação do volume remanescente para atendimento a 10 pessoas - cenário 2.	79
Figura 28: Simulação do volume remanescente para atendimento a 10 pessoas - cenário 3.	81
Figura 29: Simulação do volume remanescente para atendimento a 10 pessoas - cenário 4.	83
Figura 30: Simulação do volume remanescente para atendimento a 10 pessoas - cenário 5.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Inclinação ideal do painel conforme a latitude.....	27
Tabela 2:Fatores de Emissão (tCO ₂ /MWh) pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN).	39
Tabela 3:Indicadores de abastecimento de água em Orleans.	42
Tabela 4:Distribuição de energia elétrica em Orleans.	43
Tabela 5:Parâmetros do conjunto hidro energético.....	53
Tabela 6:Custos e parâmetros dos tipos de poços selecionados.....	54
Tabela 7:Custo de reservatório em função com volume.	55
Tabela 8:Custos da adutora (material PVC) por metro, em função do diâmetro. 56	
Tabela 9:Variáveis empregadas nos cálculos do método.	57
Tabela 10:Relação vazão de bombeamento pela vazão máxima.....	69
Tabela 11:Códigos e parâmetros dos respectivos conjuntos (bomba + painel). ...	74
Tabela 12:Custos de diversas configurações de sistemas (bomba+painel+poço).75	
Tabela 13:Otimização do sistema de acordo com o cenário 1.	76
Tabela 14:Otimização do sistema de acordo com o cenário 2.	78
Tabela 15:Otimização do sistema de acordo com o cenário 3.	80
Tabela 16:Otimização do sistema de acordo com o cenário 4.	82
Tabela 17:Otimização do sistema de acordo com o cenário 5.	84

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVOS	23
2.1	OBJETIVO GERAL	23
2.1.1	Objetivos específicos	23
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1	ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	23
3.2	ENERGIA SOLAR	25
3.3	BOMBEAMENTO SOLAR FOTOVOLTAICO	28
3.3.1	Arranjo Fotovoltaico	34
3.3.2	Inversor.....	34
3.3.3	Controladores de carga	34
3.4	SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO	35
3.5	DIMENSIONAMENTO	36
3.6	ASPECTOS ECONÔMICOS	38
3.7	ASPECTOS AMBIENTAIS	38
3.7.1	Eletrificação em Áreas Rurais	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	41
4.2	SISTEMA PILOTO	43
4.2.1	Equipamentos.....	46
4.3	ESTIMATIVA DOS BENEFÍCIOS AMBIENTAIS.....	50
4.4	MÉTODO DE SIMULAÇÃO	50
4.4.1	Volume inicial do reservatório (V_o).....	60
4.4.2	Curso de acionamento (Ca).....	61
4.4.3	Altura de água nos reservatórios.....	61
4.4.4	Escolha do sistema	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
5.1	BENEFÍCIOS AMBIENTAIS	65
5.2	FAIXA DE APLICAÇÃO DO BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO	67
5.3	VARIAÇÃO DO VOLUME EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR	67
5.4	CENÁRIOS	73
6	CONCLUSÃO.....	86
7	REFERÊNCIAS.....	87
ANEXO A	93
ANEXO B	94
ANEXO C	94
APÊNDICE 1	95
APÊNDICE 2	101
APÊNDICE 3	103

1 INTRODUÇÃO

O acesso a água de boa qualidade representa um dos principais desafios da humanidade. Aproximadamente um bilhão de pessoas não tem acesso à água tratada e 2,5 bilhões não tem condições básicas sanitárias (WHO/UNICEF, 2014). Diante desse quadro, 600.000 crianças, com menos de cinco anos morrem anualmente (WHO, 2014).

O acesso aos serviços de energia elétrica também é determinante para a qualidade de vida humana e para o desenvolvimento socioeconômico de uma nação. Contudo, aproximadamente 1,2 bilhões de pessoas não tem eletricidade em suas casas e 38% da população mundial coloca em risco a sua saúde ao utilizar meios poluentes para cozinhar (IEA, 2015). A grande maioria utiliza o carvão vegetal, altamente danoso à saúde e ao meio ambiente. Na América Latina, a exclusão elétrica está concentrada em pequenas comunidades isoladas e em condições de extrema pobreza, onde 15% da população rural ainda não têm acesso à energia na região (IEA, 2015).

O desenvolvimento econômico das últimas décadas se caracterizou pela intensa utilização de recursos finitos e poluentes na geração de energia elétrica. Entretanto, nos últimos anos, a energia solar fotovoltaica tem se destacado como uma das principais fontes renováveis para o suprimento de energia em âmbito mundial.

Apesar de sempre dispor de um notável potencial solarimétrico, apenas recentemente, o Brasil começou a investir nessa área, influenciado por alguns fatores como: a necessidade de diversificação da matriz energética e atendimento a demanda por eletricidade, a elevação constante nas tarifas, além do aumento dos incentivos governamentais para a tecnologia. Em 2014, foi realizado um leilão exclusivo para a energia solar fotovoltaica, contemplando 1 gigawatt (GW) em 31 projetos a serem iniciados até 2017 (REN, 2014).

Paralelamente, a dificuldade de acesso à água e energia, em comunidades isoladas, tem favorecido a inserção da tecnologia de bombeamento fotovoltaico.

A geração de energia com vento, água e luz solar poderia suprir a demanda energética atual até 2030 e ainda substituir todas as instalações de geração convencional por energias renováveis até 2050 (JACOBSON e DELUCCHI, 2011).

A gestão dos recursos água e energia são os principais desafios que a sociedade contemporânea tem enfrentado atualmente. Água e

energia são fatores de saúde e de progresso para as comunidades, principalmente aquelas situadas em locais remotos. Muitas vezes, essas comunidades estão localizadas sobre reservatórios de água de boa qualidade, situados nos lençóis subterrâneos. A falta de conhecimentos e de recursos financeiros, aliada, muitas vezes, à falta de energia, dificulta a resolução desse problema.

Neste sentido, torna-se de grande importância a implantação de soluções sustentáveis, através de sistemas e tecnologias estratégicas quanto à eficiência na produção de energia limpa. O melhor aproveitamento dos recursos disponíveis locais permite a promoção de novos desafios e a obtenção de soluções alternativas de baixo custo. A concepção e implantação de soluções não convencionais e flexíveis de adaptação são urgentes para contribuir significativamente para o balanço energético mundial, através de métodos mais econômicos, sociais e ambientalmente adequados.

O presente trabalho tem a finalidade de propor um método de simulação de desempenho para otimizar os custos de implantação de um sistema de abastecimento de água, considerando a captação de água subterrânea e a utilização de energia solar fotovoltaica para o bombeamento, assegurando benefícios ambientais.

Com base na operação de um sistema piloto foram coletados dados sobre as seguintes variáveis: radiação solar, as características inerentes ao sistema de energia solar empregado (painel fotovoltaico, controlador de carga e inversor), as características da bomba e do poço em função da vazão (Q), as variações do volume do reservatório e do consumo diário de água.

Esses dados foram inseridos em uma planilha eletrônica, a qual utiliza o algoritmo não linear “*Generalized Reduced Gradient*” (GRG), cuja sistematização de cálculos permite avaliar diversas inter-relações, e obter o custo otimizado para um conjunto de condições de implantação e operação, estabelecidas.

Neste contexto, foi concebido um método para aprimorar o dimensionamento de um sistema de bombeamento fotovoltaico, minimizando os custos de implantação. Adicionalmente, a partir dos fatores de emissão do sistema elétrico nacional, pretende-se estimar os benefícios ambientais associados à substituição do bombeamento elétrico convencional pelo uso de painéis fotovoltaicos. O uso da ferramenta auxiliará a tomada de decisão para a concepção de projetos, além de beneficiar as comunidades com acesso à água e energia, trazendo benefícios em todas as esferas: social, ambiental e econômico.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Propor um método de simulação de desempenho para otimização dos custos de implantação de um sistema de bombeamento fotovoltaico para pequenas comunidades.

2.1.1 Objetivos específicos

- a. Aplicar o método através da implantação de um projeto piloto de captação de água subterrânea;
- b. Verificar a aplicabilidade e limitações do método sob condições de mudanças no consumo de água e variação nos índices de radiação solar;
- c. Estimar os benefícios ambientais associados à substituição do bombeamento energético oriundo da rede elétrica pelo bombeamento fotovoltaico.

Hipótese: A partir de padrões diários de consumo de água e de disponibilidade de radiação solar, é possível otimizar o dimensionamento de um sistema de abastecimento de água, utilizando energia fotovoltaica e manancial subterrâneo, minimizando os custos de implantação e assegurando ganhos ambientais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O abastecimento de água às comunidades humanas constitui uma questão de natureza multidimensional. O cuidado com o suprimento de água às populações acompanha a humanidade desde o seu surgimento. Essa demanda significou uma condicionante para a localização e o desenvolvimento das comunidades, desde que o homem passou a viver de forma sedentária, adotando a agricultura como meio de subsistência e abandonando a vida nômade, mais centrada na caça.

Nos dias atuais, essa questão se mostra um verdadeiro desafio, com os fenômenos socioambientais contemporâneos: o crescimento populacional, a sociedade de consumo, a crise ambiental, a pequena

disponibilidade de mananciais de boa qualidade, as mudanças climáticas, entre outros.

O conceito de abastecimento de água, enquanto serviço necessário à vida das comunidades e pessoas insere-se no conceito mais amplo de saneamento, entendido, segundo a Organização Mundial de Saúde, como o controle de todos os fatores do meio físico do homem, que exercem ou podem exercer efeitos deletérios sobre seu bem-estar físico, mental ou social (WHO, 2012). Logo, o abastecimento de água deve ser compreendido como uma ação que visa prioritariamente à promoção e proteção da saúde humana.

A carência de instalações suficientes de abastecimento de água para as populações constitui uma das maiores dívidas sociais ainda remanescentes no mundo. Calcula-se que para cada dólar investido em água e saneamento, são economizados 4,3 dólares em custos de saúde no mundo e, porém, 2,5 bilhões ainda permanecem sem acesso aos serviços sanitários básicos e quase um bilhão não tem água tratada. (WHO, 2012). Obviamente, essa carência está principalmente relacionada com a pobreza mundial, havendo uma convergência entre a localização dos pobres e a dos excluídos do acesso ao abastecimento de água.

No Brasil, as reservas de água subterrânea são estimadas em 112.000 km³ (112 trilhões de m³) e a contribuição multianual média à descarga dos rios é da ordem de 2.400 km³/ano (REBOUÇAS, 1988). Nem todas as formações geológicas possuem características hidrodinâmicas que possibilitem a extração econômica de água subterrânea para atendimento de médias e grandes vazões pontuais. As vazões já obtidas por poços variam, no Brasil, desde menos de 1 m³/h até mais de 1.000 m³/h (SUASSUNA, 2001).

As águas subterrâneas no Brasil vêm sendo progressivamente explotadas para o abastecimento de cidades, indústrias, irrigação e turismo. Estima-se que existam, pelo menos, 416 mil poços no país, com um aumento anual de 10,8 mil novas captações, atendendo a 30-40 % da população (HIRATA et al, 2010).

O índice de cobertura dos serviços de água no Brasil, nos centros urbanos, é da ordem de 93%, média nacional (BRASIL, 2012); todavia, nas áreas rurais, a proporção de domicílios ligados a redes de abastecimento era da ordem de 33,2% segundo dados do PNAD, 2012 (IBGE, 2014).

As despesas com energia elétrica no setor de saneamento representaram cerca de três bilhões de reais, em 2009 no Brasil (SNIS, 2010). Os sistemas de água consumiram 9,47 TWh, correspondente a

aproximadamente 2% do consumo total de energia do país (455,7 TWh em 2010), conforme dados pelo Balanço Energético Nacional do ano 2011. (GOMES, A.S., 2013). Em alguns casos, os custos operacionais de um sistema de abastecimento de água estiveram acima de 60% dos gastos totais (HELLER, L. PÁDUA, V.L., 2006). Estima-se que o bombeamento de água seja responsável por cerca de 90% a 95% do total dos gastos com energia elétrica no abastecimento de água, a depender de fatores físicos como a extensão da rede e a topografia local (ABES, 2009).

A disponibilidade de energia elétrica constitui um item fundamental na proposição de alternativas. A ausência de energia elétrica, que pode ocorrer em comunidades isoladas e de pequeno porte, demanda soluções para bombeamento de água com o uso de tecnologias alternativas de energia, como por exemplo, os sistemas de bombeamento solar fotovoltaico.

3.2 ENERGIA SOLAR

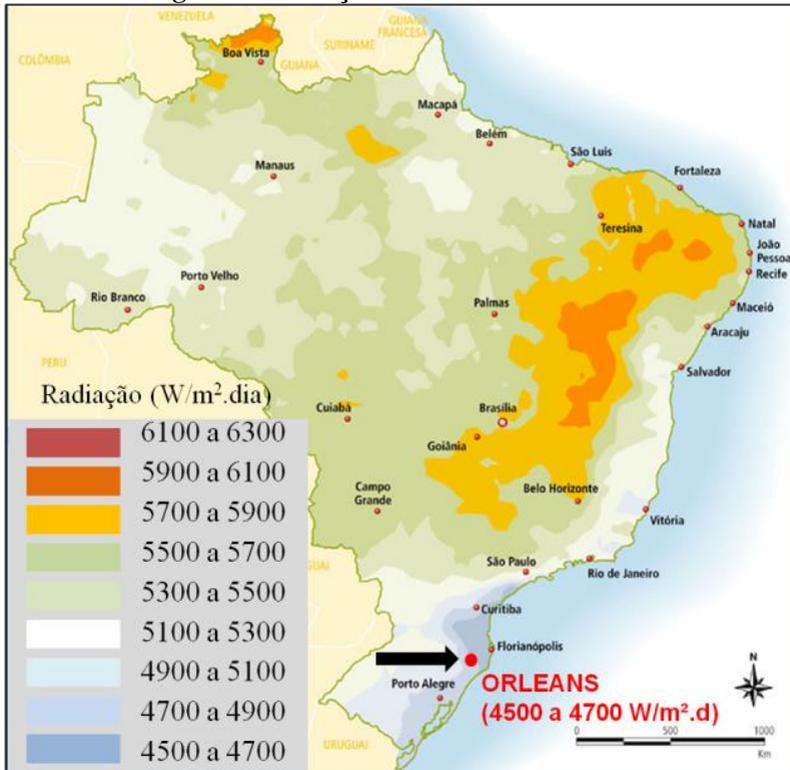
O sol emite energia para a Terra, numa quantidade equivalente a cerca de 10.000 vezes o consumo mundial de energia primária (CRESESB, 2005).

A radiação solar que atinge a atmosfera terrestre pode ser decomposta, para fins de análise, de diferentes formas. Para o aproveitamento fotovoltaico, a de maior interesse é a Irradiação Global Horizontal (GHI), que quantifica a radiação recebida por uma superfície plana horizontal, composta pela Irradiação Difusa Horizontal (DIF) e pela Irradiação Direta Horizontal (IDH). A DIF é refletida em nuvens, poeiras, vapor d'água e outros elementos em suspensão na atmosfera. Por sua vez, a DNI atinge o solo diretamente, sem reflexões. Em dias nublados, a principal quantidade se refere à DIF, enquanto que em dias claros predomina a IDH. A IDH é muito variável ao longo do dia, principalmente em locais com altos índices de nebulosidade. (WILCOX, S. GUEYNARD, C. 2009).

Os instrumentos utilizados para medir a radiação solar são chamados de radiômetros. Dependendo do tipo da componente da radiação medida, estes passam a ter nomes específicos, como exemplo, o aparelho para medição da radiação solar global recebe o nome de piranômetro.

O mapa seguinte (Figura 1) apresenta a média anual diária de radiação solar incidente no território brasileiro, com destaque para a região de estudo, em vermelho.

Figura 1: Radiação Solar Global no Brasil.



Fonte: Adaptado de Atlas de Energia Elétrica no Brasil, ANEEL, 2005.

A conversão direta de energia luminosa, associada aos fótons, em energia elétrica é denominada de efeito fotovoltaico e constitui um dos princípios da energia solar fotovoltaica.

A variação da posição da Terra em relação ao Sol ao longo do ano determina os ângulos de inclinação dos módulos fotovoltaicos, em relação ao norte (azimute) e em relação ao plano horizontal, mais adequados para a otimização do aproveitamento solar quando são utilizados painéis fixos, que não acompanham a trajetória aparente diária do Sol.

No hemisfério sul, os painéis fotovoltaicos devem estar voltados para o norte “verdadeiro” (NV), e a inclinação com o plano horizontal pode ser ajustada para elevar ao máximo a produção em cada

uma das estações do ano, ou para maximizar a produção média ao longo do ano. Neste último caso, os módulos devem estar inclinados em relação ao plano horizontal num ângulo que varia conforme a latitude da instalação, conforme exposto na tabela 1.

Tabela 1: Inclinação ideal do painel conforme a latitude.

Latitude	Ângulo de inclinação
0 a 4 graus	10 graus
5 a 20 graus	latitude + 5 graus
21 a 45 graus	latitude + 10 graus

Fonte: SolarTerra, 2015.

As análises das limitações e dos níveis de irradiação solar para diferentes ângulos de inclinação e desvios azimutais são importantes para auxiliar a integração de painéis fotovoltaicos em edificações, permitindo melhorar o desempenho destes sistemas. Artigo recente aponta gráficos de intensidade de radiação para diferentes inclinações e desvios azimutais em 12 (doze) capitais brasileiras. (PORTOLAN.I ; RUTHER, R., 2014)

Assim, é possível prever quais as perdas esperadas nos casos em que orientação e inclinação são limitadas ou estão previamente estabelecidas, como em imóveis já construídos, por exemplo. Outro estudo recente relacionado a um projeto fotovoltaico integrado à arquitetura original e localizado em baixa latitude, apontou perdas em torno de 12%, influenciadas pelo sombreamento e a orientação não apontada diretamente para o Norte. O baixo desempenho apresentado nos meses de inverno foi compensado pelo ótimo desempenho demonstrado nos meses de verão. (URBANETZ, J. ; ZOMER D.C. ; RUTHER, R., 2011)

Desse modo, a instalação de painéis fotovoltaicos em estruturas e edifícios já concebidos se mostra favorável do ponto de vista econômico, não compensando muitas vezes alterar o projeto original para colocar estruturas destinadas aos painéis.

A energia solar fotovoltaica tem expandido de modo acelerado nos últimos anos. Dentre os fatores responsáveis por esse crescimento destacam-se: os incentivos governamentais e políticas combinadas com redução nos custos da tecnologia. Tais políticas têm norteado o mercado de uma maneira nunca antes observada. (REN, 2013)

No Brasil, a energia solar também vem crescendo rapidamente, especialmente o sistema de micro geração distribuída para usos residencial e comercial. Tal cenário tem atraído os interesses de diversas

empresas multinacionais, influenciados pelo grande potencial de insolação e a regulamentação do setor.

Em abril de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, aprovou regras destinadas a reduzir as barreiras para instalação de geração distribuída de pequeno porte, que incluem a micro geração, com até 100 KW de potência, e a mini geração, de 100 KW a 1 MW. De acordo com as novas regras, além da regulamentação da produção de energia solar no país, há agora o sistema de compensação de créditos a favor do consumidor, o qual permite ao consumidor instalar módulos fotovoltaicos e injetar energia na rede em troca de créditos. (ANEEL, 2012)

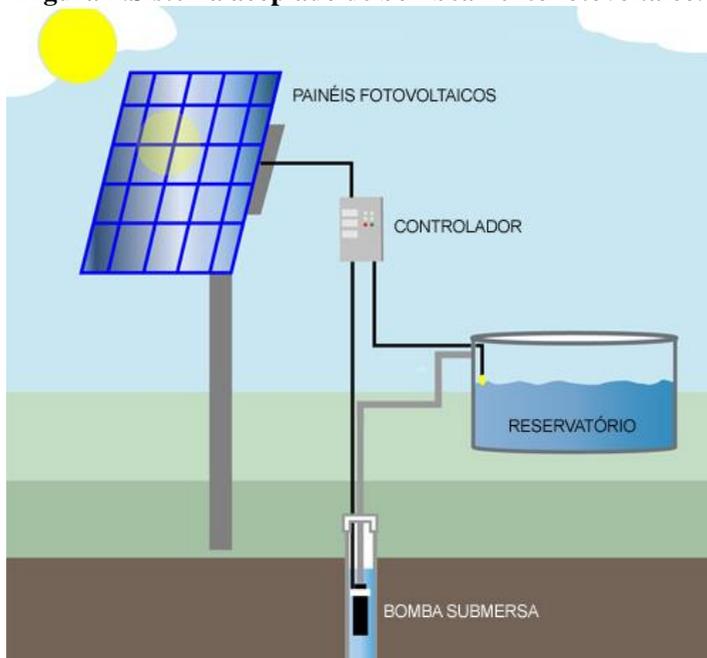
Todos esses fatores têm viabilizado economicamente os sistemas de energia solar. Atualmente o custo caiu para R\$ 300 a 400/MWh com perspectiva maior de queda. (EPE, 2013).

Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica se apresenta com maior potencial de penetração no horizonte decenal, dadas as iniciativas regulatórias recentes observadas no país. De acordo com o Plano Decenal de Energia 2013, em relação à geração distribuída no horizonte decenal, o consumo atendido com a autoprodução e a fotovoltaica, representará cerca de 12% do consumo de eletricidade e 2% do consumo energético total em 2023. (MME, 2013)

Em 2014, foi realizado um leilão exclusivo para a energia solar fotovoltaica, contemplando 1 gigawatt (GW) em 31 projetos a serem iniciados até 2017.

3.3 BOMBEAMENTO SOLAR FOTOVOLTAICO

Uma das aplicações da energia solar fotovoltaica é o bombeamento de água. Um sistema de bombeamento fotovoltaico é constituído por gerador fotovoltaico, dispositivo de condicionamento de potência (inversor, controlador de carga), conjunto motobomba e reservatório de água, conforme ilustra a Figura 2. Diferentemente dos sistemas domiciliares de geração de energia elétrica, geralmente não são utilizadas baterias para o armazenamento de energia.

Figura 2: Sistema acoplado de bombeamento fotovoltaico.

Fonte: Energia Pura, 2015.

De forma geral, a água é bombeada e armazenada em reservatórios, para sua posterior utilização, os quais são dimensionados para determinado número de dias de autonomia (da mesma forma que um banco de baterias).

Em usos comerciais, o gerador fotovoltaico costuma ser fixo, ainda que seja possível a utilização de rastreadores solares, que aumentam a captação de energia na superfície do gerador, e conseqüentemente, o volume de água bombeado. Entretanto, o custo desses aparelhos limita a sua aplicação.

Há aproximadamente 50.000 sistemas fotovoltaicos de bombeamento d'água distribuídos mundialmente com ampla concentração nas regiões rurais de países da Ásia, África e América Latina (REN21, 2013). A Índia é um dos países com maior número de sistemas instalados, com aproximadamente 7000 projetos (PILLAI, I.R.; BANERJEE, R., 2009). No ano de 2010 instalou mais de 50 MWp em projetos fotovoltaicos isolados da rede, a maior parte relacionada ao bombeamento fotovoltaico (CAMPANA, 2013).

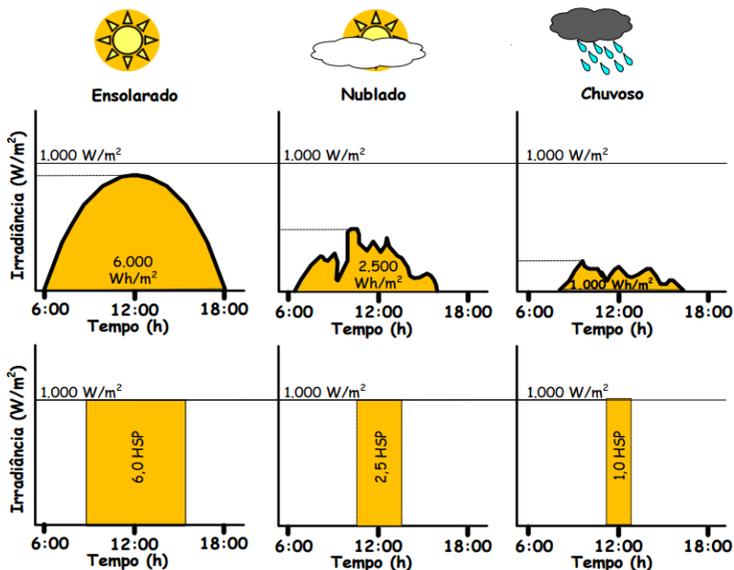
Segundo estimativa de profissionais da área, há cerca de 70 MWp de potência instalada em sistemas de bombeamento fotovoltaico em todo o mundo, o que proporciona o bombeamento de 2 milhões de metros cúbicos a uma altura manométrica de 20 metros, beneficiando uma população de cerca de 40 milhões de pessoas. No Brasil, não há uma estimativa recente. Em 2003, havia mais de 3.500 sistemas de bombeamento fotovoltaico totalizavam uma potência superior a 1,5 MWp. (FEDRIZZI, 2003).

Para efeito de dimensionamento, a energia disponível em um determinado período, dada em kWh/m², é geralmente convertida para outra unidade denominada de Horas de Sol Pleno (HSP). O conceito de Horas de Sol Pleno é dado pelo número de horas de sol, em média diária, com uma intensidade de 1.000 W/m². É equivalente à energia total diária incidente sobre a superfície do gerador em kWh/m².

Considerando-se que ao nível da superfície terrestre a irradiância solar máxima situa-se em um nível de 1.000 W/m², 1 HSP é a energia recebida durante uma hora com essa irradiância. Como ao longo de um dia este valor máximo de irradiância se consegue próximo ao meio-dia e durante pouco tempo, o número de HSP em um dia é calculado dividindo-se a energia recebida, em kWh/ m², pelo nível da irradiância de pico, 1.000 W/m². No Brasil, esse valor oscila entre 4 e 6 HSP, média diária anual, de acordo com a região geográfica.

A figura 3 ilustra o significado desse conceito para três dias com diferentes perfis de irradiância.

Figura 3: Dias com diferentes valores de horas de sol pleno.

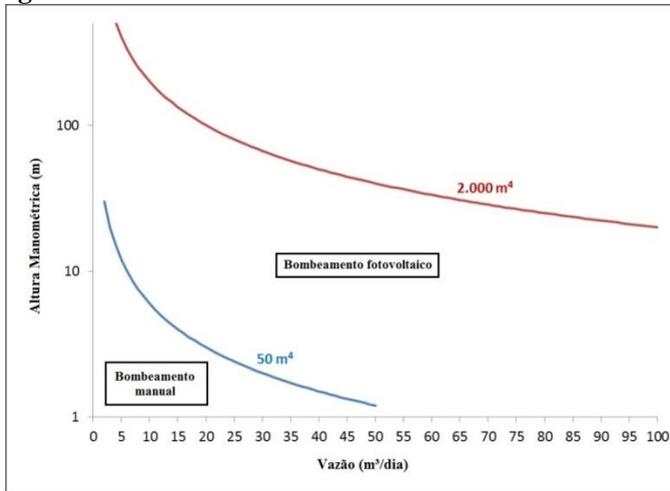


Fonte: PINHO e GALDINO, 2014.

Os sistemas de bombeamento fotovoltaico apresentam algumas vantagens como o baixo custo de operação, pouca manutenção, operação autônoma, fácil instalação e longo ciclo de vida. Esses fatores são importantes em regiões remotas sem disponibilidade de energia elétrica (GHONEIM, 2005). Assim, são sistemas particularmente indicados para pequenas vilas com 100 a 1000 habitantes e para agricultura de escala moderada (ALIGAH, 2011). As principais aplicações para sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água são: residenciais, em pequenas comunidades; destinadas ao consumo animal; e em sistemas de irrigação.

O gráfico da Figura 4 mostra a região de aplicação dos sistemas de bombeamento fotovoltaico, em termos da vazão e da altura manométrica do sistema, utilizando o parâmetro m^4 ($m^3 \times m$). Para valores de m^4 inferiores a 50, considera-se adequado o bombeamento manual, enquanto que para valores superiores a 2.000, o bombeamento fotovoltaico não é considerado viável (TIBA, 1998).

Figura 4: Faixa dos sistemas de bombeamento fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de TIBA, 1998.

Há diversas alternativas de tecnologias para realizar o bombeamento em locais desprovidos de rede elétrica, entre as quais: a bomba manual, a bomba acionada com motor diesel ou a gasolina, a bomba eólica, e a bomba solar fotovoltaica.

A bomba manual é de tecnologia simples, tem custo baixo, não requer combustível e é de manutenção fácil. Entretanto, aplica-se a alguns tipos de poços e, normalmente, é usada para pequenos volumes de água bombeada.

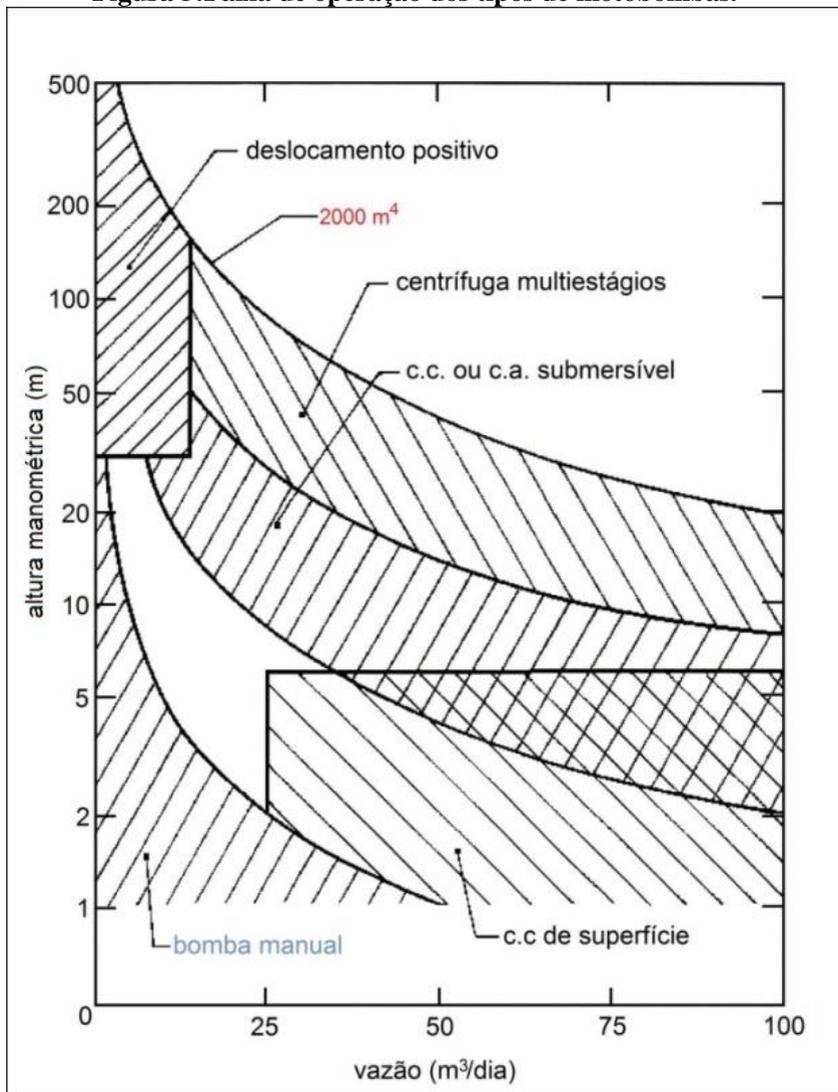
As bombas acionadas com diesel ou gasolina comumente têm grande capacidade de bombeamento de água e relativamente custam pouco, mas necessitam frequente manutenção, têm problemas do custo do combustível necessário à sua operação, gerando poluição atmosférica e grande ruído.

Por sua vez, os sistemas de bombeamento com módulos fotovoltaicos são eficientes, confiáveis, necessitam de pouca manutenção e tem apresentado um custo relativamente baixo (PINHO e GALDINO, 2014). São sistemas idealizados especificamente para bombeamento de água de poços, lagos e rios. Uma característica deste tipo de sistema é o fato de dispensar o armazenamento da energia elétrica gerada pelos painéis solares, já que se pode armazenar a água bombeada em reservatórios. Nos períodos noturnos ou quando não há

insolação, pode-se utilizar a água armazenada em um reservatório elevado.

A figura 5 apresenta as faixas de operação, em função da vazão e profundidade, para cada tipo de bomba.

Figura 5: Faixa de operação dos tipos de motobombas.



Fonte: Adaptado de TIBA, 1998

A seguir são detalhados os equipamentos associados à geração de energia elétrica, como o arranjo fotovoltaico e os dispositivos de condicionamento de potência.

3.3.1 Arranjo Fotovoltaico

Arranjo fotovoltaico pode ser entendido como o conjunto de módulos fotovoltaicos, ligados eletricamente entre si, que funcionam como um único gerador de energia elétrica. Os módulos podem ser ligados entre si em paralelo ou em série, dependendo da sua aplicação. Quando é feita a ligação série, as tensões são somadas e a corrente permanece inalterada. Quando temos uma ligação em paralelo, as tensões nas células são iguais e as correntes são somadas.

Para o correto dimensionamento dos módulos, é necessário que se conheça o comportamento da carga bem como o seu ciclo de utilização. Alguns fatores devem ser levados em consideração, os quais influenciam na potência de saída dos painéis, tais como: sombreamento; intensidade luminosa; inclinação do telhado; temperatura das células; nebulosidade.

3.3.2 Inversor

Inversor é um dispositivo elétrico que usa um mecanismo de chaveamento (transistores, IGBT ou MOSFET) para alternar o fluxo de corrente sendo assim capaz de converter corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Normalmente um inversor para sistemas de bombeamento possui tensão de entrada de 12, 24 ou 48 V (CC) e converte em 127 ou 220 V (CA) (ALTENER, 2004).

3.3.3 Controladores de carga

Os controladores de carga possuem a função de proteção contra corrente reversa, carga e descarga excessiva das baterias e sobrecorrente. Seu funcionamento se dá através da leitura da tensão das baterias para determinar o seu estado de carga.

Os circuitos internos dos controladores variam, mas a maioria dos controladores faz a leitura da tensão para controlar a intensidade de corrente que flui para as baterias na medida em que estas se aproximam da sua carga máxima (ALTENER, 2004).

3.4 SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO

O desempenho de um sistema de bombeamento fotovoltaico pode ser avaliado por meio de um programa de simulação, onde são considerados diversos parâmetros inerentes ao sistema, como a respectiva localização geográfica e padrões de consumo de água. Assim, são revisadas as metodologias e ferramentas computacionais para previsão e avaliação de desempenho, aplicadas em vários estudos.

GAD (2009) desenvolveu uma metodologia através de um programa de computador para simular o desempenho de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água para uso doméstico, no Egito. O programa simulou, hora após hora, o desempenho do sistema durante cada dia do ano, com orientações potencializadas dos módulos fotovoltaicos nas diferentes estações do ano. A eficiência calculada do conjunto fotovoltaico foi de 13,86% nos invernos e 13,91% nos verões. MOHANLAL et al., (2004) por sua vez, ajustando manualmente os painéis solares, três vezes ao dia, obtiveram uma eficiência 20% maior quando comparada a configuração fixa.

LOXSOM e VEROJ, (1994) criaram um algoritmo para avaliar o desempenho mensal de um sistema de bombeamento fotovoltaico. A partir da média mensal dos dados de insolação foi possível estimar o total do volume mensal de água bombeada utilizando um método de simulação horária.

HADJ ARAB et al., (1991) analisaram o desempenho de configurações distintas de sistemas de bombeamento fotovoltaico em quatro diferentes localidades da Argélia utilizando dados do “ano meteorológico padrão” (TMY – *typical metereological year*). O estudo foi realizado com duas tecnologias de painéis fotovoltaicos, três capacidades de reservatório e com diversas alturas manométricas aplicadas a duas bombas centrífugas. Para todas as configurações, concluiu-se que a localização geográfica influencia diretamente no desempenho do sistema, e os custos dos geradores solares fotovoltaicos podem diminuir se o programa de simulação considerar os tipos de bombas utilizados, a altura manométrica envolvida e o perfil de carga diária. Portanto, o sistema pode ser aperfeiçoado com o estudo das necessidades individuais utilizando um programa de computador abalizado com modelos matemáticos.

3.5 DIMENSIONAMENTO

Diferentes abordagens têm sido tratadas pelos pesquisadores, de modo a buscar a solução ideal para o dimensionamento de um sistema de bombeamento fotovoltaico.

O dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos consiste em encontrar as cargas elétricas necessárias com a menor média diária de insolação na superfície dos módulos fotovoltaicos, usualmente nos meses de inverno. (PINHO e GALDINO, 2014)

Para se alcançar a otimização de um sistema de abastecimento de água com o uso de energia fotovoltaica conforme tratado em DJURIN et al., (2011) torna-se necessário analisar alguns fatores e a inter-relação existente entre eles, tais como: as condições externas locais (temperatura e incidência de radiação solar), as características inerentes ao sistema de energia solar empregado (painel fotovoltaico, controlador de carga e inversor), as características da bomba e do poço em função da vazão (Q), as variações do volume do reservatório e do consumo diário de água.

De acordo com WAGDY et al., (1994) três parâmetros são fundamentais para analisar o desempenho de um sistema: o tamanho dos módulos fotovoltaicos, a capacidade do banco de baterias e o volume do reservatório. A solução ideal é aquela que reduz o tamanho dos módulos fotovoltaicos, já que é o item de maior custo.

Em um sistema de bombeamento fotovoltaico, destacam-se os seguintes subsistemas e suas dependências:

- Produção: depende do número de poços, além da hidrogeologia;
- Transporte: depende do tipo de bomba e da altura manométrica total;
- Geração: depende da radiação solar e dos painéis fotovoltaicos;
- Armazenamento: depende da produção, transporte e consumo.

O padrão de consumo é influenciado pelos hábitos da população e/ou pelas demandas de uso da água.

Apesar de se tratar de um sistema complexo, o bombeamento fotovoltaico pode ser otimizado com a aplicação de uma abordagem sistemática e o uso de ferramentas adequadas. Estudo recente realizou simulações nas curvas típicas de consumo de água e radiação solar para definição da potência do gerador fotovoltaico e do volume do reservatório (DJURIN, 2011). Basicamente um dimensionamento ideal do sistema passa por essa relação entre a potência dos módulos fotovoltaicos e o volume do reservatório. Outra pesquisa estabeleceu cinco parâmetros relacionados ao desempenho de dois diferentes tipos

de módulos fotovoltaicos (silício cristalino e silício amorfo), a fim de atender a demanda necessária de água para uma comunidade isolada com o menor preço (GHONEIM, 2006).

A otimização do dimensionamento dos equipamentos tende a ser a principal fonte para a minimização dos custos de investimento, pois uma pequena redução de gastos em cada parte do sistema pode implicar uma economia considerável no montante total do projeto. (FEDRIZZI, 2003)

O dimensionamento de um sistema de bombeamento consiste, basicamente, em definir a potência de pico do gerador fotovoltaico, selecionar a motobomba e o tipo de controlador eletrônico eventualmente necessário. Para isso é necessário conhecer as necessidades de água, as características do poço, as alturas manométricas envolvidas, as características da insolação local e outras circunstâncias do projeto.

As necessidades de água devem ser levantadas como em um sistema convencional, levando-se em conta que quanto maior é a quantidade de água bombeada maiores serão os custos, principalmente do gerador fotovoltaico. Essas necessidades devem ser criteriosamente levantadas com base nas características locais, no sistema de distribuição de água empregado e nas possibilidades de uso da água (consumo humano, dessedentação de animais, irrigação etc.).

Para o bombeamento fotovoltaico são indicados poços de até 50 metros, situados fora do centro, em caso de moradias ao entorno (FEDRIZZI, 2003). É importante levantar as características do poço, principalmente o nível estático e dinâmico, e as capacidades de fornecimento de água para as épocas mais críticas do ano, confrontando-as com as necessidades de água da comunidade. Deve-se definir a posição do reservatório e calcular as alturas manométricas envolvidas.

Os parâmetros básicos para se selecionar o sistema de bombeamento são a altura manométrica, em metros de coluna de água e a vazão de água, em metros cúbicos por dia. Geralmente, as bombas de deslocamento positivo são mais adequadas para baixas vazões e alturas maiores e as bombas centrífugas submersíveis para vazões mais elevadas e alturas médias (FEDRIZZI et al, 2004).

A forma mais adequada para escolha do sistema de bombeamento e da capacidade do gerador fotovoltaico é trabalhar com as curvas dos fabricantes de bombas específicas para sistemas fotovoltaicos.

3.6 ASPECTOS ECONÔMICOS

É muito importante que as considerações econômicas sejam criteriosamente avaliadas ao se projetar um sistema de bombeamento para uma aplicação específica. Deve-se levar em conta não apenas o investimento inicial, mas também os gastos de operação e manutenção e também as características específicas do local, do poço e da comunidade. É importante também que seja avaliada a infraestrutura necessária para manter o poço em funcionamento.

Quanto mais afastado dos centros urbanos, mais competitiva se torna a opção fotovoltaica, sendo que, para sistemas com características de até 6.000 m⁴ por dia, a opção fotovoltaica é mais vantajosa do que a opção com bombeamento a diesel (FEDRIZZI, 2003). Essa competitividade sustenta no fato de apresentar alta confiabilidade técnica e autonomia em termos do recurso energético, pouca manutenção, além da isenção na emissão de ruídos e poluentes na operação.

Para qualquer localidade distante pelo menos 10 km da rede elétrica, torna-se mais viável a opção fotovoltaica para o bombeamento de água. (MARTINS, 2001)

Um dos maiores gastos associados está atrelado aos módulos fotovoltaicos, em torno de 40% dos custos totais. Entretanto, os preços são altamente variáveis dependendo do mercado (CAMPANA, 2013).

3.7 ASPECTOS AMBIENTAIS

O debate acerca das mudanças climáticas eclodiu em 1987, por ocasião da publicação do relatório Nosso Futuro Comum pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas. Neste relatório, pela primeira vez, a acumulação dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera era advertida oficialmente como um risco planetário.

A Convenção sobre o Clima, ocorrida no Rio de Janeiro em 1992, estabeleceu o princípio de que os países industrializados deveriam reduzir suas emissões de gases causadores do aumento do efeito estufa.

Em dezembro de 2015, na Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas, realizada em Paris, aprovou-se o primeiro acordo global para frear as emissões de gases do efeito estufa e para lidar com os impactos da mudança climática.

O Brasil possui uma matriz energética comparativamente “limpa”, com baixos níveis de emissões de gases de efeito estufa por unidade de energia produzida ou consumida. Entretanto, a demanda brasileira por eletricidade tem crescido mais rapidamente que a produção de energia primária, resultando no acionamento das usinas termelétricas, o que faz aumentar o fator de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Resumidamente, o fator de emissão é um algoritmo amplamente utilizado para quantificar a contribuição futura de um projeto que vai gerar energia elétrica em termos de redução de emissões de CO₂ em relação a um cenário de base.

A sistemática de cálculo dos fatores de emissão de CO₂ foi desenvolvida em cooperação entre o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) e o Ministério de Minas e Energia (MME), tendo como base as diretrizes da metodologia ACM0002 e a respectiva ferramenta “*Tool to calculate the emission factor for an electricity system*”, aprovada pelo Conselho Executivo do MDL, entidade ligada às Organizações das Nações Unidas (UNFCCC, 2015). Coube ao Operador Nacional do Sistema (ONS) explicar ao grupo as práticas operativas do SIN, reguladas pela ANEEL. Assim, os fatores de emissão de CO₂ passaram a ser calculados pelo ONS, e disponibilizados para consulta por meio do endereço eletrônico do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (Tabela 2).

Tabela 2: Fatores de Emissão (tCO₂/MWh) pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Ano	Fator de emissão (t CO ₂ /MWh)
2011	0,3073
2012	0,4185
2013	0,4653
2014	0,5224
2015	0,5317

Fonte: Ministério de Ciência Tecnologia e Inovação(MCTI), 2015.

O aumento verificado, nos anos de 2011 a 2015, refere-se à diminuição das chuvas nas bacias hidrográficas, onde estão localizadas as usinas hidrelétricas, e a maior participação das usinas termelétricas no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Assim, os projetos que ofertam energia elétrica ou que reduzem ou eliminam o consumo de energia da rede devem utilizar o fator de emissão de CO₂ associado à rede para calcular as reduções obtidas com a implantação do projeto.

Os projetos de bombeamento solar fotovoltaico dispensam o uso de energia elétrica oriunda da rede e também a utilização de combustíveis fósseis, evitando novas emissões de dióxido de carbono (CO₂). Neste contexto, ao analisar comparativamente o cenário de prática comum (bombeamento elétrico) com o projeto proposto (bombeamento fotovoltaico), torna-se possível quantificar as emissões evitadas, por meio dos fatores de emissão de CO₂.

3.7.1 Eletrificação em Áreas Rurais

Os sistemas de bombeamento fotovoltaico costumam ser empregados em comunidades rurais. Nessas localidades deve-se optar pela utilização das redes convencionais tipo pilar, com estruturas tipo P (pilar fixado diretamente no poste). As redes tipo pilar são redes convencionais que não utilizam cruzetas em sua montagem. Nelas o isolador é fixado diretamente no poste, por meio de ferragens adequadas (parafuso, suporte e cinta). Devido ao menor número de materiais utilizados, a estrutura tipo pilar apresenta menor custo inicial, porém em áreas urbanas seu padrão dificulta a realização de serviços de manutenção que envolva equipamentos, como por exemplo, transformadores de distribuição (CELESC, 2015).

A grande vantagem do uso das redes tipo pilar é sua aplicação em áreas menos urbanizadas, alimentadores expressos e áreas rurais. Frequentemente é utilizado a rede primária monofásica de 15 kV, resultando em um custo de aproximadamente R\$ 20.000 por quilômetro. Comparativamente as redes convencionais de média tensão apresentam custos de R\$ 80.000 reais/km e as redes compactas 150.000 reais/km (CELESC, 2015).

A instalação de redes elétricas em áreas rurais podem acarretar impactos ambientais de distintas categorias, como: supressão da vegetação e interferência no solo, o que reflete no aumento de turbidez na água e deterioração da qualidade dos mananciais.

Os sistemas autônomos de bombeamento fotovoltaico, não necessitam de cabeamento para transmitir a eletricidade, assegurando-se diversos ganhos ambientais.

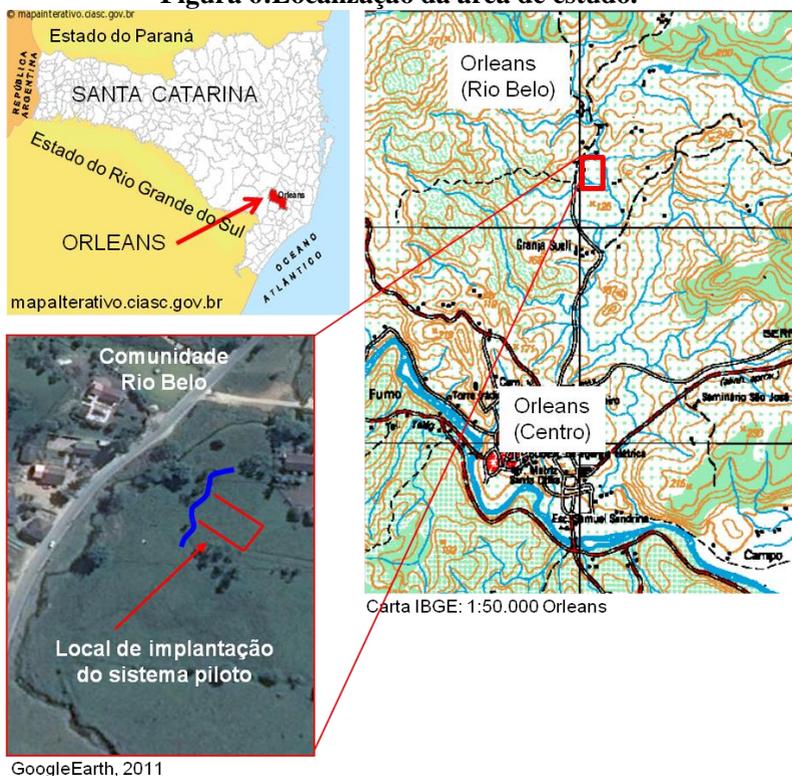
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está situada em uma comunidade rural do bairro Rio Belo, município de Orleans, não atendida por sistema de abastecimento de água da concessionária local. Por essa razão, a área foi escolhida para a implantação e operação do sistema piloto com captação de água subterrânea e energia solar fotovoltaica para bombeamento.

A figura 6 detalha a localização do município de Orleans no Estado de Santa Catarina, do bairro Rio Belo no município de Orleans, e do sistema piloto no bairro Rio Belo.

Figura 6: Localização da área de estudo.



Fonte: Adaptado de CIASC, Google e IBGE.

Segundo o Censo Demográfico, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2010), o município de Orleans, fundado em 1884, possui uma área de 548,792 km². A população residente é de 21.393 habitantes, das quais 16.084 compõem a área urbana (75,18%) e os demais 5.309, que representam um percentual de 24,82%, vivem em áreas rurais do município.

O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDH-M) de Orleans é 0,755, considerado alto. De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), o IDH é uma medida resumida do progresso em longo prazo, em três dimensões básicas do desenvolvimento humano: renda, educação e saúde.

Um panorama sobre o abastecimento de água e energia elétrica no município é apresentado adiante. A tabela 3 expõe as características do abastecimento de água, detalhado com o número de domicílios, por tipo de abastecimento, para o ano de 2010.

Tabela 3: Indicadores de abastecimento de água em Orleans.

Tipo de abastecimento de água	Domicílios	Percentual
Rede geral	4.917	73,71%
Poço ou nascente na propriedade	1.137	17,04%
Poço ou nascente fora	611	9,16%
Rio, açude, lago ou igarapé	4	0,06%
Outra	2	0,03%
Total	6.671	100%

Fonte: SEBRAE, 2010.

O município, em 2010, possuía 1.748 domicílios com captação de água em poços ou nascentes, representando 26,2 % do total de domicílios existentes em Orleans.

Com relação aos serviços de energia elétrica são mostrados a segmentação por classe de consumidoras, em 2010, representada na tabela 4 a seguir.

Tabela 4: Distribuição de energia elétrica em Orleans.

Tipo de Consumidor	Unidades	Consumo (kWh)	Percentual
Residencial	4.735	11.284.162	11,45%
Industrial	204	59.885.356	60,74%
Comercial	611	6.003.755	6,09%
Rural	322	3.057.684	3,10%
Setor Público	88	3.056.866	3,10%
Consumo Próprio	1	6.237	0,01%
Revenda	2	15.299.169	15,52%
Total	5.963	98.593.229	100 %

Fonte: SEBRAE, 2010.

As áreas rurais do município de Orleans consumiram aproximadamente 3,0 MWh, representando 3,10% da demanda de energia elétrica, em 2010, no município de Orleans. Por sua vez, as indústrias representaram mais de 60% do consumo de energia elétrica. Destacam-se o setor de embalagens plásticas, molduras, implementos agrícolas e carrocerias, além de grande produção de madeira beneficiada (ORLEANS, 2015).

4.2 SISTEMA PILOTO

O sistema piloto está localizado em uma comunidade rural do bairro Rio Belo. De acordo com a Prefeitura de Orleans, o bairro tem área de 14,7 km², com 1059 habitantes e um total de 348 domicílios compostos, em média, por 3,2 indivíduos. A sub-bacia do Rio Belo, um dos recursos hídricos formadores da bacia hidrográfica de Orleans ocupa uma área de 5,8 km² (ORLEANS, 2015).

A figura 7 denota a passagem do Rio Belo nas adjacências do sistema piloto.

Figura 7: Rio Belo, no entorno do sistema piloto.

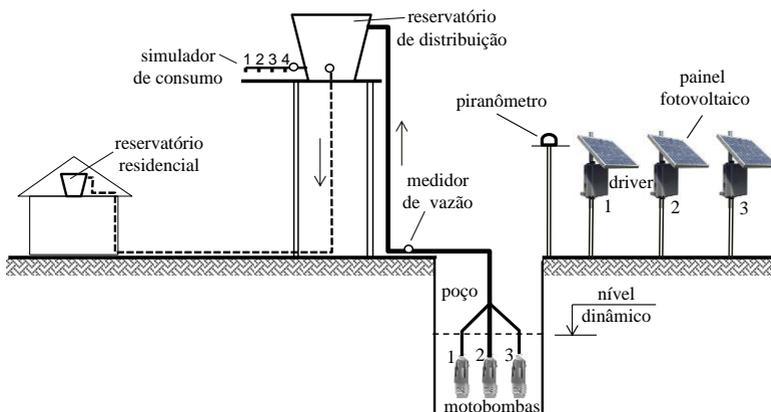


Fonte: Imagem de arquivo do projeto.

O experimento consiste em um sistema de abastecimento de água composto por captação em poço, bombeamento solar, reservação e distribuição. A figura 8 ilustra o sistema piloto utilizado, onde as principais características são descritas a seguir:

- Um poço de produção, tipo escavado, diâmetro interno de 1 m, com capacidade máxima de 2 m³/h;
- Três sistemas de bombeamento fotovoltaico, composto por painel fotovoltaico de 175 Wp, bomba submersa vibratória de 100 W e driver;
- Um reservatório com volume de 5000 litros para armazenamento e distribuição da água.

Figura 8: Arranjo geral do sistema piloto



Com o intuito de, opcionalmente, simular no sistema piloto o consumo de mais de uma residência, foi desenvolvido um dispositivo simulador de consumo. O aparato é composto por quatro válvulas solenoides acionadas por temporizadores analógicos programáveis (*timers*). Cada uma das quatro saídas do simulador possui orifício com diferente abertura, de forma que, a combinação de válvulas abertas, permite, a cada 30 minutos, obter o volume consumido equivalente ao de certo número de residências, seguindo um determinado padrão de consumo. A parametrização do consumo da propriedade foi feita através de um estudo local, baseado na aplicação de um questionário sobre os hábitos de consumo de água de seus moradores (Apêndices 1 e 2), e instalação de um medidor eletromagnético com *datalogger*, na saída do reservatório da residência. O período de coleta dos dados foi entre os meses de julho de 2014 a dezembro de 2015.

O sistema piloto foi equipado com os seguintes sistemas de medição e registro de dados em *data loggers*: medidores eletromagnéticos de vazão, na saída das bombas e saídas do reservatório, com registro dados a cada 2 minutos; medidores de nível no poço e reservatório, com registro de dados a cada 15 minutos; piranômetro, com registro de dados a cada 10 segundos. Todos os equipamentos mencionados são detalhados na sequência. A figura 9 apresenta o sistema piloto de bombeamento fotovoltaico empregado.

Figura 9: Sistema piloto de bombeamento fotovoltaico.



Fonte: Foto de arquivo do projeto.

Conforme mencionado anteriormente, o sistema piloto está localizado em Orleans, latitude 28. De acordo, com as recomendações da tabela 1, os painéis fotovoltaicos foram fixados com inclinação de 38°, de forma a obter a maior média de produção anual de energia.

4.2.1 Equipamentos

Os aparelhos utilizados na medição e coleta de dados, bem como os equipamentos que compõem o sistema piloto são descritos a seguir.

4.2.1.1 Medidor eletromagnético de vazão

Para contribuir com a coleta de dados utilizaram-se medidores eletromagnéticos de vazão, modelos VMS-019B224K e PRO1000 da marca Incontrol, equipados com *data logger*, os quais registraram o bombeamento e consumo de água durante o intervalo de tempo programado. Os equipamentos são fabricados em PVC e possuem fácil programação, o que garante a segurança dos dados coletados mesmo em momentos de falta de energia elétrica. A figura 10 ilustra os aparelhos.

Figura 10: Medidores eletromagnéticos de vazão.



Fonte: Incontrol, 2015.

4.2.1.2 Medidor de nível (*levellogger*)

Para analisar a variação dos níveis de água, no poço e no reservatório, utilizaram-se medidores de nível automáticos, da Solinst, série Gold, juntamente com *data logger*. O aparelho registra os dados de temperatura e pressão d'água a cada 15 minutos, conforme programação prévia. A figura 11 exhibe o modelo do equipamento empregado.

Figura 11: Medidor de nível (*levelogger*)



Fonte: Solinst, 2015.

4.2.1.3 Pirânometro

Para a coleta dos dados de radiação solar foi instalado um pirânômetro Apogee SP-110, com registro de dados a cada 10 segundos. Este aparelho está conectado a um *datalogger* CR 200X da Campbell Scientific. Ambos dispositivos são mostrados na Figura 12.

Figura 12: Pirânômetro (à esquerda) e *datalogger* (à direita).



Fonte: (Apogee, Campbell, 2015).

Os respectivos equipamentos foram instalados na área de estudo em abril de 2015, início de coleta dos dados de radiação solar. O monitoramento foi realizado durante todo o período do experimento, com especial atenção para os meses de inverno, historicamente com menores índices de radiação solar. As medições realizadas constam no Apêndice 3.

4.2.1.4 Módulo fotovoltaico

Para o suprimento da carga elétrica referente aos equipamentos de medição dos dados, utilizou-se um painel solar, policristalino, com potência de 250 Wp. A figura 13 ilustra o equipamento citado. Maiores detalhes sobre as especificações técnicas constam no Anexo B.

Figura 13: Módulo solar Kyocera 250W.

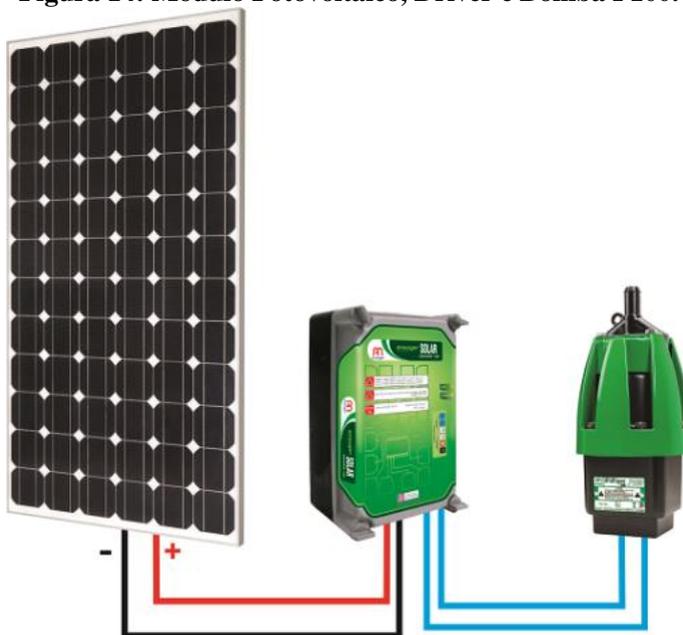


Fonte: Kyocera, 2016.

4.2.1.5 Bombas solares e painéis fotovoltaicos

No sistema piloto foram utilizados três sistemas, independentes, composto por bomba submersa vibratória solar de 100 watts, com módulos fotovoltaicos, células tipo monocristalino (Mono-Si), de 175 Wp cada. A energia elétrica proveniente do painel solar é fornecida à bomba através do dispositivo driver, que controla e atenua as variações de vazão em função das oscilações da radiação solar. A figura 14 ilustra os equipamentos mencionados.

Figura 14: Módulo Fotovoltaico, Driver e Bomba P100.



Fonte: Anauger, 2015.

Para medir as variações da vazão em função da radiação solar ($\text{Wh/m}^2\cdot\text{dia}$), adotou-se a relação da vazão diária bombeada pelo sistema piloto (Q_b), com a vazão máxima dada pelo fabricante ($Q_{\text{máx}}$).

Com o intuito de examinar a correlação dos dados anteriormente citados, utilizou-se o coeficiente de correlação por postos de Spearman, aplicando-se a equação 1:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1)$$

n = número de amostras (dias);

d = desvio padrão.

4.3 ESTIMATIVA DOS BENEFÍCIOS AMBIENTAIS

O cenário de prática comum, no território brasileiro, referente ao bombeamento de água, divide-se entre aquele realizado por meio de energia elétrica ou alimentado com diesel. Descartar essas alternativas, de modo geral, é evitar diversos impactos ambientais, tanto no ar, água e solo. Assim, optar pelo bombeamento solar fotovoltaico já acarreta inúmeros benefícios ambientais. Uma das maneiras de se mensurar o benefício ambiental é pela quantidade evitada de gases de efeito estufa (GEE) com o uso do sistema de bombeamento solar.

Para realizar essa estimativa, utilizam-se a potência nominal do sistema de bombeamento, o número de horas de funcionamento, e o fator de emissão do Sistema Interligado Nacional, calculado segundo a metodologia proposta pela ONU, baseada no uso do fator de emissão (t CO₂/MWh) do Sistema Interligado Nacional.

As equações da potência consumida pelo sistema de bombeamento, e do cálculo de emissões, com as unidades das variáveis entre parênteses, são descritas a seguir nas equações 2 e 3:

$$Poc(Wh) = Pon(W) \times ho(h) \quad (2)$$

$$E (tCO_2) = Poc(Wh) \times 10^{-6} \times FE \left(\frac{tCO_2}{MWh} \right) \quad (3)$$

Poc: Potência consumida(Wh)

Pon: Potência nominal(W)

ho: número de horas em operação (h)

E: Emissões (tCO₂)

FE: Fator de emissão $\left(\frac{tCO_2}{MWh} \right)$

4.4 MÉTODO DE SIMULAÇÃO

O sistema de bombeamento fotovoltaico pode ser dividido em quatro processos: produção, geração, transporte e armazenamento, onde o consumo de água é a principal condicionante, e determina as configurações do sistema. Assim, o método considera as condições de contorno de cada processo, traduzindo em custos.

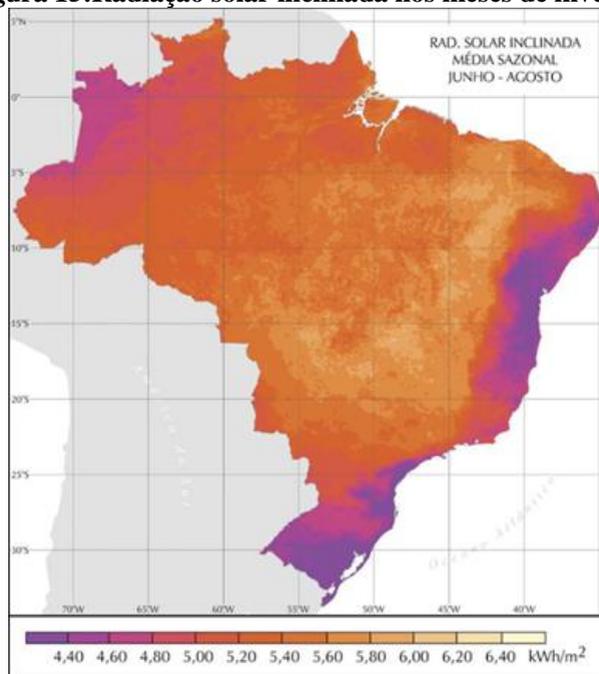
O método busca fornecer a capacidade de um reservatório, o qual atenda determinada demanda de água, baseado no padrão de consumo, nas condições de radiação solar, bombeamento e capacidade

de produção do poço. Os dados necessários para a aplicação do método são mencionados adiante.

Inicialmente, foi estabelecido o padrão de consumo de água na propriedade rural para a concepção do sistema de bombeamento fotovoltaico. Com a aplicação de um questionário, foi caracterizado o consumo de água na propriedade, onde se estabeleceram cenários de consumo mínimo, médio e máximo. Para efeitos comparativos, o mesmo questionário foi aplicado em outras cinco propriedades da região. Com a instalação de um medidor eletromagnético de vazão, entre os meses de março e maio de 2015, definiu-se o padrão de consumo diário de água na propriedade.

Para subsidiar o método utilizou-se o mapa de radiação no plano inclinado, média sazonal (junho a agosto) do Atlas Brasileiro de Energia Solar, ilustrado na Figura 15. Os menores valores de radiação no plano inclinado ocorrem nos meses de inverno, em todo o território brasileiro.

Figura 15: Radiação solar inclinada nos meses de inverno.

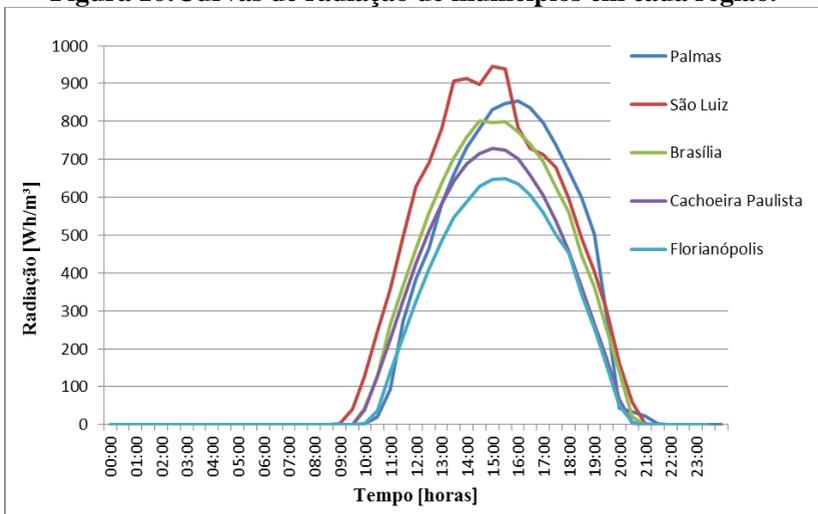


Fonte: Atlas de Energia Solar do Brasil, 2006 – INPE.

Adicionalmente foram utilizados dados de estações solarimétricas do SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais), projeto do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), referentes a média de radiação solar, durante o mês de julho, de estações solarimétricas de um município de cada região do território brasileiro, descritos a seguir: Palmas (região Norte), São Luís (região Nordeste), Brasília (região Centro Oeste), Cachoeira Paulista (região Sudeste) e Florianópolis (região Sul).

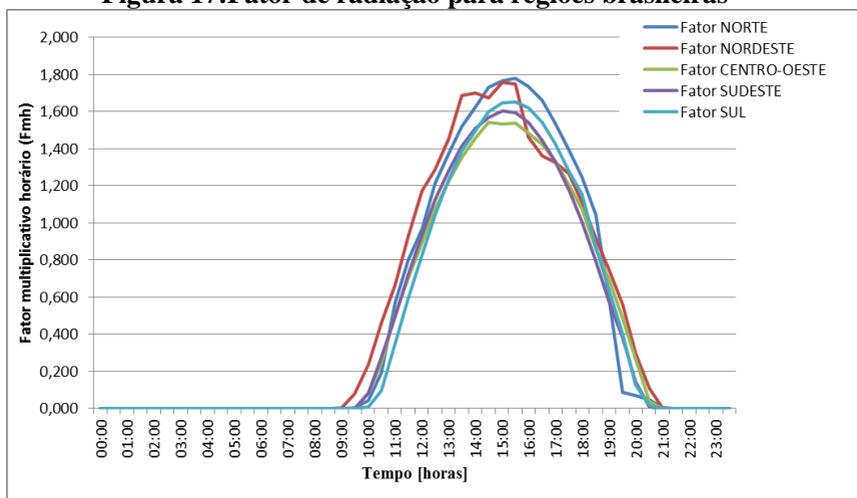
A figura 16 ilustra o perfil de radiação solar de alguns municípios brasileiros em cada região.

Figura 16: Curvas de radiação de municípios em cada região.



Fonte: Adaptado a partir de dados de SONDA, 2014.

Através das curvas específicas de radiação foram determinados os fatores de intensidade solar, a cada meia hora, em cada região brasileira (Figura 17). Assim, torna-se possível analisar a variação do bombeamento em função da radiação incidente no intervalo considerado. Portanto, quando não é informado o padrão de radiação da localidade, utilizam-se os fatores da respectiva região para simular o desempenho e definir as configurações ideais do sistema a ser implantado.

Figura 17: Fator de radiação para regiões brasileiras

Fonte: Adaptado a partir de dados de SONDA, 2014.

Com a finalidade de atender distintas faixas de vazão e altura manométrica de um dado sistema, utilizou-se uma base de dados com sete diferentes configurações de conjuntos hidro energéticos (bomba + painéis fotovoltaicos), apresentados na tabela 5. Na maioria dos casos, dois ou mais subsistemas podem cumprir os requisitos da altura manométrica e vazão requerida. Após o processo de otimização, o referido método seleciona o melhor conjunto hidro energético, juntamente com o tipo de poço e volume do reservatório.

Tabela 5: Parâmetros do conjunto hidro energético.

Potências Bomba[W]-Painéis [Wp]	Hm máx [m]	Qmín [m³/d]	Hm mín [m]	Qmáx [m³.d]	Custo [R\$]
100W - 100Wp	40	0,65	0	4,6	1900
100W - 180Wp	40	1,2	0	8,6	2200
600W - 735Wp	100	3	30	13	6600
600W - 810Wp	30	13	10	20	6600
1500W-2240Wp	60	20	40	40	15000
2200W-3240Wp	50	40	20	60	20500
3000W-4590Wp	60	40	40	60	26800

Fonte: Levantamento com diversos fornecedores em outubro de 2015.

O método considera, em função da vazão necessária, a utilização, com número variado, de poço escavado ou de poço tubular, sedimentar ou não, cuja produção máxima deve ser informada, em função da vazão de exploração de cada região. A depender do local, o poço escavado é de engenharia mais simples, realizado geralmente com escavação manual, tornando-se menos oneroso por não haver a necessidade de deslocar equipamentos para perfuração.

A tabela 6 apresenta os custos de perfuração e mobilização (deslocamento), incluídos mão de obra e equipamentos. As respectivas cotações são baseadas em levantamento com empresas da região de Orleans. Cabe ressaltar, que as despesas relativas aos poços apresentam grande flutuação por localidade devido às características econômicas e técnicas de cada região, como disponibilidade de mão de obra e equipamentos. Portanto, em cada situação, o banco de dados do método precisa ser alimentado com os valores atrelados à região pretendida.

Tabela 6: Custos e parâmetros dos tipos de poços selecionados.

Poço	*Construção [R\$/m]	Mobilização equipamento [R\$]	****Q _{max} [m ³ /h]
**Escavado	280,00	500,00	3
***Tubular	500,00	2500,00	8

*não incluso o fornecimento e instalação de motobomba;

**diâmetro 1m, profundidade até 10m, abertura manual, revestimento com tubos de concreto;

***diâmetro até 8", profundidade até 40 m, abertura com perfuratriz rotativa; revestimento com tubos de PVC geomecânico;

****Vazão máxima de exploração esperada.

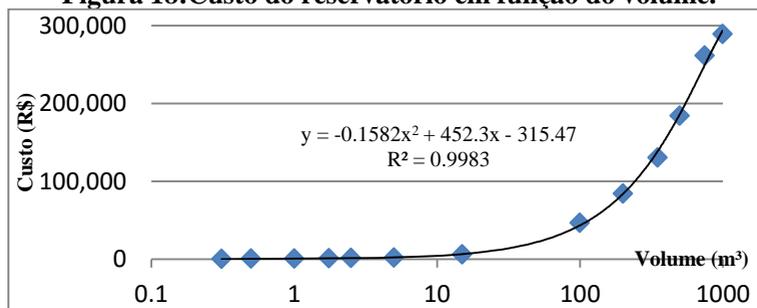
Para os reservatórios, são considerados dois materiais distintos em função do volume nominal: polietileno para volumes de até 20 m³, e acima dessa quantidade, utiliza-se concreto ou aço carbono. O custo estimado de implantação do reservatório em polietileno e aço carbono varia conforme o volume do mesmo (Tabela 7). O custo médio inclui os serviços de fornecimento (com transporte) e instalação do tanque, não levando em consideração a montagem das bases.

Tabela 7: Custo de reservatório em função com volume.

Volume (m ³)	Custo(R\$)
0,31	229,99
0,50	280,00
1,00	470,00
1,75	880,08
2,50	1.200,00
5,00	1.600,00
15,00	5.680,50
100,00	46.160,00
200,00	42.055,00
350,00	37.259,00
500,00	36.832,00
750,00	34.829,00
1.000,00	28.900,00

Fonte: Levantamento com Casas d'Água, Balarotti e Açomac (2015).

Como os valores orçados de reservatórios de polietileno são limitados até 20 m³, e os de aço carbono iniciam-se a partir de 100 m³, extrapolaram-se valores intermediários através de uma linha de tendência pelo método dos mínimos quadrados. A figura 18 ilustra a variação do preço de acordo com o volume do reservatório.

Figura 18: Custo do reservatório em função do volume.

Fonte: Elaboração própria, conforme levantamento dos fabricantes citados acima.

Por fim, consideraram-se os custos da adutora, decorrentes da utilização de tubos de PVC, conexões e demais elementos, pertencente às partes hidráulicas. A tabela 8 expõe os custos por metro, em função do diâmetro, relativos ao fornecimento e assentamento de PVC com junta elástica. A fonte de pesquisa foi o Sistema Nacional de Pesquisa e Custos da Construção Civil (SINAPI), referentes a janeiro de 2016.

Tabela 8: Custos da adutora (material PVC) por metro, em função do diâmetro.

Diâmetro (mm)	Custo (R\$/m)
50	1,30
75	1,73
100	2,17
150	2,60
200	3,04
250	3,47
300	4,34
350	4,78
400	6,56
500	7,24
600	8,11
700	8,84
800	9,66
900	10,44
1.000	11,12

Fonte: SINAPI, 2016 (referência: janeiro de 2016).

Conforme mencionado anteriormente, os métodos de simulação de desempenho são objetos de investigação no campo da tecnologia de bombeamento fotovoltaico. As pesquisas comumente utilizam intervalos horários. Com o intuito de avaliar a resiliência do sistema, o método proposto considera as condições mais críticas do ano, sendo realizada uma simulação por um período de seis dias com intervalos de 30 minutos.

O fluxograma, representado na figura 19, demonstra a metodologia utilizada no método de simulação. Posteriormente, são descritas as abordagens e parâmetros do referido método.

A Tabela 9 apresenta uma síntese das variáveis consideradas no método, as respectivas unidades e fontes utilizadas.

Tabela 9: Variáveis empregadas nos cálculos do método.

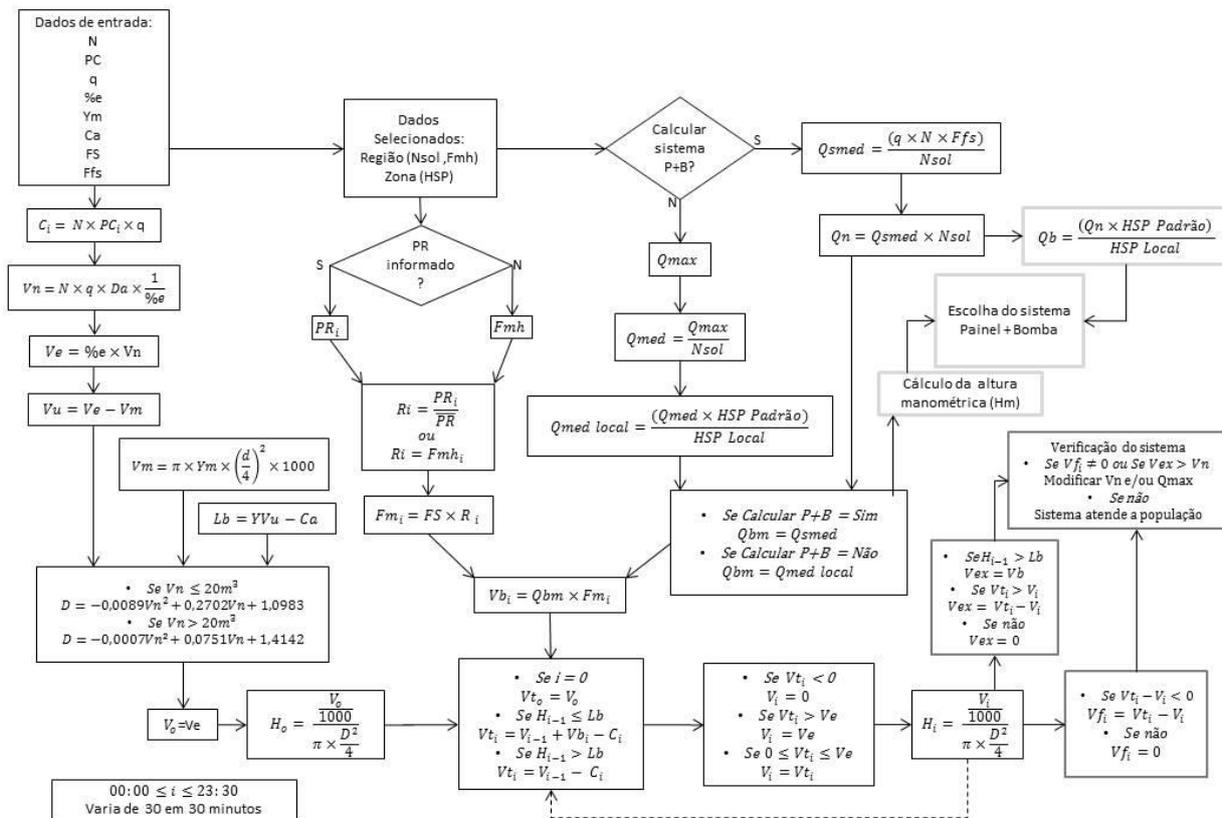
Variável	Unidade	Fonte
Região, Latitude e Longitude	---	Informado
Número de pessoas (N)	pessoas	Informado
Dias de Autonomia (Da)	dias	Informado
Fator de segurança falta de sol (Ffs)	adim.	Informado
Altura Geométrica (Hg)	metros	Informado
Comprimento de Recalque (L)	(m)	Informado
Somatório de singularidades (K)	adim.	Informado
Fator sol (FS)	adim.	Informado
Consumo médio per capita de água (q)	L/(hab* ³)	Informado
Altura do volume morto (Ym)	(m)	Informado
Porcentagem de enchimento (%e)	%	Informado
Horas de sol pleno padrão (HSP padrão)	horas	Informado
Padão de Consumo (PC)	Adim.	Inf. ou
Volume inicial (Vo)	Litros	Inf. ou
Radiação total local (Rtl)	Wh/m ²	Inf. ou
Zona	---	Selecionado
Horas de sol pleno local (HSP local)	horas	Selecionado
Número de horas de sol (NS)	horas	Selecionado
Fator multiplicativo horário (Fmh)	adim.	Selecionado
Volume morto (Vm)	Litros	Calculado
Volume de enchimento (Ve)	Litros	Calculado
Volume útil (Vu)	Litros	Calculado
Volume nominal (Vn)	Litros	Calculado
Radiação média local (Rml)	W/m ²	Calculado
Fator multiplicativo radiação solar (R)	adim.	Calculado
Fator de multiplicação horário (Fm)	adim.	Calculado
Vazão máxima dada pelo fabricante	(L/dia)	Informado
Maior índice de radiação (IRmax)	Wh/m ²	Calculado
Vazão de bombeamento média dada pelo	(L/h)	Calculado
Vazão de bombeamento média local (Qmed)	(L/h)	Calculado
Vazão de bombeamento máxima horária	(L/h)	Calculado
Vazão para cálculo do diâmetro da adutora	(L/h)	Calculado
Vazão de bombeamento média com	(L/h)	Calculado
Vazão de bombeamento máxima com	(L/h)	Calculado
Vazão necessária para sistema (Qn)	(L/h)	Calculado
Vazão nominal da bomba (Qb)	(L/dia)	Calculado
Diâmetro de recalque (Dr)	(mm)	Calculado
Velocidade (Vel)	(m/s)	Calculado
Reynolds (Re)	adim.	Calculado
Fator de fricção	adim.	Calculado
Perda de carga unitária (J)	(m/m)	Calculado

Perda de carga localizada (JL)	(m)	Calculado
Altura manométrica (Hm)	(m)	Calculado
Vazão média de bombeamento (Qbm)	(L/h)	Calculado
Altura de água para ligar a bomba (Lb)	(m)	Calculado
Altura do volume útil no reservatório (YVu)	(m)	Calculado
Curso de acionamento da bomba (Ca)	(m)	Calculado
Volume bombeado (Vb)	(L)	Calculado
Altura de água no reservatório (H)	(m)	Calculado
Volume teórico do reservatório(Vt)	(L)	Calculado
Volume remanescente no reservatório (V)	(L)	Calculado
Volume excedente do reservatório (Vex)	(L)	Calculado
Volume de falta do reservatório (Vf)	(L)	Calculado
Diâmetro do reservatório (D)	Metros(Calculado

*INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Especiais

**SONDA: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

Figura 19: Fluxograma de cálculo da capacidade do reservatório



Inicialmente devem ser informados alguns dados obrigatórios como: a localização geográfica, o número de pessoas, consumo per capita, período de autonomia, altura geométrica, comprimento de recalque e custos de poços atrelados à região.

Adiante devem ser definidos os cenários diários quanto aos seguintes perfis de irradiância: ensolarado, sol entre nuvens, nublado ou chuvoso. Cada perfil possui um fator solar associado a Horas de Sol Pleno (HSP), sendo “1” para dia ensolarado com 6 HSP; 0,71 - sol entre nuvens com aproximadamente 4,3 HSP ; 0,42 , dia nublado com 2,5 HSP, e 0,17, dia chuvoso com 1 HSP. O conceito de Horas de Sol Pleno é dado pelo número de horas de sol, em média diária, com uma intensidade de 1.000 W/m^2 . É equivalente à energia total diária incidente sobre a superfície em kWh/m^2 (PINHO e GALDINO, 2014).

De acordo com a localização geográfica se torna possível o conhecimento do perfil de radiação solar da região citada. Todavia, existe a opção de incluir curvas pré-existentes de radiação solar, além de utilizar um sistema de bombeamento e reservatório já existentes. O padrão de consumo também pode ser alterado, uma vez que é influenciado pelos hábitos da população e demanda do uso da água. Cabe ressaltar, que a curva adotada é referente ao consumo no meio rural. De qualquer modo, o padrão de consumo, juntamente com o número de pessoas e o consumo per capita remetem a quantidade de água utilizada e serve para o dimensionamento do sistema.

A seguir são descritas e explicadas algumas condições iniciais pré-definidas, acerca dos parâmetros para a operação do método em conformidade com o sistema piloto.

A partir do volume nominal (V_n) é calculado o volume de enchimento (V_e). Nos cenários foi definida a porcentagem de enchimento de 85% para coincidir com os dados do reservatório do sistema piloto. O volume de enchimento (V_e) foi criado, pois os reservatórios convencionais normalmente não apresentam a capacidade que está descrita no volume nominal, visto que existe um extravasor (ladrão) que não deixa o reservatório ficar 100% cheio. Subtraindo do V_e o volume morto (V_m) é possível calcular o volume útil (V_u). O volume útil é o volume que pode ser utilizado quando o reservatório está com sua capacidade máxima.

4.4.1 Volume inicial do reservatório (V_0)

A simulação é iniciada sempre às 6:00h ($t_0 = 6:00\text{h}$). Considerou-se que o reservatório não está com a capacidade máxima

($V_o=V_u$) nesse período, pois o bombeamento cessa no final da tarde e há consumo no período noturno. Assim, a partir do padrão de consumo, somaram-se os volumes consumidos durante o intervalo de 18h às 6:00h, aproximadamente 0,24% do volume total consumido durante um dia. Por fim, o volume inicial do reservatório é definido como: $V_0 = 0,75 V_u$.

4.4.2 Curso de acionamento (C_a)

O curso de acionamento (C_a) corresponde a altura de ligação e desligamento da bomba, normalmente realizada por meio de uma eletroboia. Sensores de nível ultrassônico também podem ser utilizados para medir a distância entre o nível mínimo e máximo, relativos ao acionamento e desligamento da bomba. O curso de acionamento (C_a) da bomba influencia diretamente na vazão e, conseqüentemente, na operação do sistema piloto. Existe a possibilidade de o reservatório estar próximo ao nível máximo durante o período de maior insolação e, portanto, não bombear água nesse momento. Por exemplo, para $C_a=0,08m$ a bomba seria acionada com o nível $0,08m$ abaixo do nível máximo. Porém, se houvesse radiação para bombear e o reservatório estivesse com o nível de $0,07m$ abaixo do máximo, a bomba não seria acionada, deixando de bombear, no caso do sistema piloto, um volume de $275,8$ litros aproximadamente e podendo deixar de armazenar esse volume, caso isso ocorresse nas últimas horas do dia com radiação. No método foi adotado valor zero ($C_a = 0,00m$), pois o intuito foi medir a vazão de bombeamento, comparar com a radiação e armazenar o maior volume possível.

4.4.3 Altura de água nos reservatórios

Para facilitar o cálculo da altura de água do reservatório, adotaram-se os reservatórios como forma cilíndrica.

4.4.4 Escolha do sistema

A escolha do conjunto hidro energético (bomba e painel) é feita a partir da Figura 20, que testa cada configuração e faz a escolha do subsistema com menor custo. Através dessa escolha e dos parâmetros mencionados acima, o método fornece o dimensionamento otimizado dos subsistemas (poço, conjunto hidro energético - bombas e painéis

fotovoltaicos - e reservatórios), de modo a garantir a melhor economia e assegurar o suprimento de água almejado. A figura 21 ilustra a planilha de custos referente ao processo de otimização.

Os sistemas são enumerados de 8 a 22 podendo ser acrescentado outros sistemas ao método posteriormente. Cada sistema tem um código de bomba fixo e quantidade de poços e bombas também fixa. Para simplificar, adotou-se que cada poço comporta apenas uma bomba. A escolha preliminar do sistema é feita a partir da Figura 20, que verifica para cada sistema disponível se a vazão para cálculo do diâmetro da adutora (Q_d) não ultrapassa a vazão máxima do poço. Isso ocorre para os dois casos, poços escavados ou poços sedimentares. Após a escolha do tipo de poço, o valor atribuído é somado ao custo do conjunto hidro energético (bomba e painel). Verifica-se então se existe um ponto de funcionamento, que atenda as seguintes condições: a altura manométrica deve estar dentro do limite compreendido pela bomba, a vazão necessária não pode ser maior do que a vazão de bombeamento do sistema para a altura manométrica calculada. Dessa forma o método escolhe o sistema com o menor custo para a vazão dada e calcula a vazão máxima que o mesmo poderia atender.

O custo total é a somatória dos custos parciais (adutora, reservatório, bomba, painel e poço). O custo da adutora é constante, ou seja, o menor custo é encontrado ponderando o custo do reservatório e do sistema (bomba, painel e poço).

Para encontrar o dimensionamento otimizado, utiliza-se o algoritmo não linear GRG, que dentre as configurações possíveis (códigos 8 a 22) busca simultaneamente, a vazão máxima do sistema e o volume do reservatório ideais. Para tornar isso possível são definidas as variáveis de restrição: volume do reservatório (litros), vazão do sistema (litros/dia), volume de falta (litros) e volume excedente (litros).

Figura 20:Planilha de escolha preliminar do sistema para 50 pessoas e cenário 1

Código do Sistema	Código da Bomba	Quantidade de bombas	Qd (m³/h)	Poço E	Poço S	Escolha Poço	Custo R\$ Bomba + Pannel	Custo R\$ Bomba+Painel +Poço	Atende	R\$	Qmax (m³/d)
8	1	1	5.09	N	25000	S	1900	26900.00	N	FALSO	2.54
9	2	1	5.09	N	25000	S	2200	27200.00	N	FALSO	4.75
10	3	1	5.09	N	25000	S	6600	31600.00	N	FALSO	223.06
11	4	1	5.09	N	25000	S	6600	31600.00	N	FALSO	16.21
12	5	1	5.09	N	25000	S	15000	40000.00	N	FALSO	59.18
13	6	1	5.09	N	25000	S	20500	45500.00	S	45500.00	59.46
14	7	1	5.09	N	25000	S	26800	51800.00	N	FALSO	79.18
15	2	2	2.54	11000	45000	E	4400	15400.00	N	FALSO	9.50
16	4	2	2.54	11000	45000	E	13200	24200.00	S	24200.00	32.43
17	4	3	1.69	16000	65000	E	19800	35800.00	S	35800.00	48.64
18	3	2	2.54	11000	45000	E	13200	24200.00	N	FALSO	32.12
19	3	3	1.69	16000	65000	E	19800	35800.00	N	FALSO	47.27
20	2	3	2.54	16000	65000	E	6600	22600.00	N	FALSO	13.73
21	6	2	2.54	11000	45000	E	41000	52000.00	S	52000.00	118.91
22	7	2	2.54	11000	45000	E	53600	64600.00	N	FALSO	158.37

Escolha Sistema					
Quantidade	Código da bomba	Código do sistema	Tipo do poço	ValorR\$	Qmax(m³/d)
2	4	16	E	24200	32427.97144

Figura 21: Planilha de custos do sistema com a otimização para 50 pessoas e cenário 1.

Variáveis de restrição						
Volume do reservatório (l)		12858,62				
Vazão do Sistema(l/dia)		32400,00				
Volume de falta (l)		0,00				
Volume excedente (l)		15302,35				
Custo parcial						
Adutora R\$		75,6				
Reservatório R\$		5474,33				
Bomba+Painel+Poço R\$		24200,00				
Custo Total (R\$)		29749,93				
Escolha Sistema						
Quantidade de poços e bombas	Código da bomba	Código do sistema	Tipo do poço	Vazão Maxima para o sistema		
2	4	16	E	32427,97144		
Bomba+Painel						
Código da Bomba	Bomba+Painel	Hm max[m]	Qmin [m³/dia]	Hm min[m]	Qmax [m³/dia]	Preço R\$
1	100W-100Wp	40	0,65	0	4,60	1900,00
2	180W-180Wp	40	1,20	0	8,60	2200,00
3	600W-735Wp	100	3,00	30	13,00	6600,00
4	600W-810Wp	30	13,00	10	20,00	6600,00
5	1500W-2240Wp	60	20,00	40	40,00	15000,00
6	2200W-3240Wp	50	40,00	20	60,00	20500,00
7	3000W-4590Wp	60	40,00	40	60,00	26800,00

Por limitações do método, definiram-se as seguintes condições de contorno:

- Volume do reservatório maior ou igual que 50 litros; ($Vr \geq 50$)
- Volume excedente maior ou igual que 1 litro; ($Vex \geq 1$)

Para atender os parâmetros das configurações existentes do subsistema (Bomba+painel), considerou-se:

- Vazão do sistema entre 4.000 e 150.000 L/d; ($4.000 \leq Qt \leq 150.000$)

Finalmente para assegurar que não faltará água, nas condições pré-estabelecidas é fixado:

- Volume de falta igual à zero. ($Vf = 0$)

Não foram considerados neste trabalho, os custos decorrentes de acessórios elétricos, como fios, cabos, conexões elétricas, além de elementos de fixação mecânica, como parafusos e suportes comuns à estrutura, uma vez que tais custos, com raras exceções, demandam a mesma quantidade e, por conseguinte, a mesma despesa para qualquer conjunto de bomba, painel e reservatório considerado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 BENEFÍCIOS AMBIENTAIS

Para mensurar os benefícios ambientais associados à substituição do bombeamento elétrico pelo sistema fotovoltaico, utilizaram-se as equações 1 e 2, baseada no uso do fator de emissão (tCO_2/MWh) do Sistema Interligado Nacional. Os cálculos e resultados são descritos a seguir:

As concessionárias de energia elétrica utilizam a potência nominal dos equipamentos para o dimensionamento de sistemas de energia. Assim, considerou-se a potência nominal das três bombas solares, operando em paralelo, cada uma com 100 Watts de potência (P), ambas funcionando diariamente durante um período de 10 horas (8h-18h), tem-se, portanto:

$$\text{Poc(Wh)} = 300 \text{ Watts} \times 10 \text{ horas} = 3,0 \text{ kWh} \quad (2)$$

Poc: Potência consumida(Wh).

A potência consumida mensalmente é de 90 kWh, e no ano, aproximadamente 1,095 MWh. Para o cálculo das emissões evitadas anualmente, adotou-se o fator de emissão mais atual, referente ao ano de 2015, (0,5317 t CO₂/MWh).

$$\text{Ee}(tCO_2) = 1,095 MWh \times 0,5317 \frac{tCO_2}{MWh} = 0,5822 \frac{tCO_2}{ano} \quad (3)$$

Ee: Emissões evitadas (tCO₂).

Considerando o total de gases de efeito estufa emitido por um país e dividindo pela sua população, chega-se ao conceito de “pegada de carbono” por habitante. Em 2014, a pegada de carbono de um brasileiro era igual a 7,85 toneladas de CO₂ (Iniciativa Verde, 2014).

A seguir é dada a quantidade de CO₂ por pessoas atendidas pela vazão recalçada:

$$\text{Ep} = 5,82 \frac{kgCO_2}{hab.dia}$$

Ep: Emissões evitadas anualmente pelo número de pessoas atendidas $\left(\frac{kgCO_2}{hab.dia}\right)$.

Considerando as três bombas do sistema, com a vazão máxima dada, tem-se Q=16,8 m³/ dia

$$\text{Eq} = 0,346 \frac{kgCO_2}{m^3}$$

Eq: Emissões de CO₂ no ano, por pessoa atendida, pela vazão recalçada $\left(\frac{kgCO_2}{m^3}\right)$

Não foram encontrados na literatura valores relacionados a pessoa atendida para efeito de comparação.

5.2 FAIXA DE APLICAÇÃO DO BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

A viabilidade do bombeamento fotovoltaico pode ser avaliada pela multiplicação das variáveis, vazão (m^3) e profundidade (m), resultando em m^4 . TIBA (1998) acredita que a faixa de aplicação do bombeamento fotovoltaico se insere entre 50 e 2000 m^4 . FEDRIZZI (2003) sugere valores até 6000 m^4 em comparação com o bombeamento a diesel.

O sistema piloto com altura manométrica de aproximadamente 12 m, operando com 3 bombas em paralelo, em condições de 6 h de sol pleno ($Q=16,8 m^3/dia$), deriva o valor de 200 m^4 , justificando a aplicação do bombeamento fotovoltaico em ambos os casos.

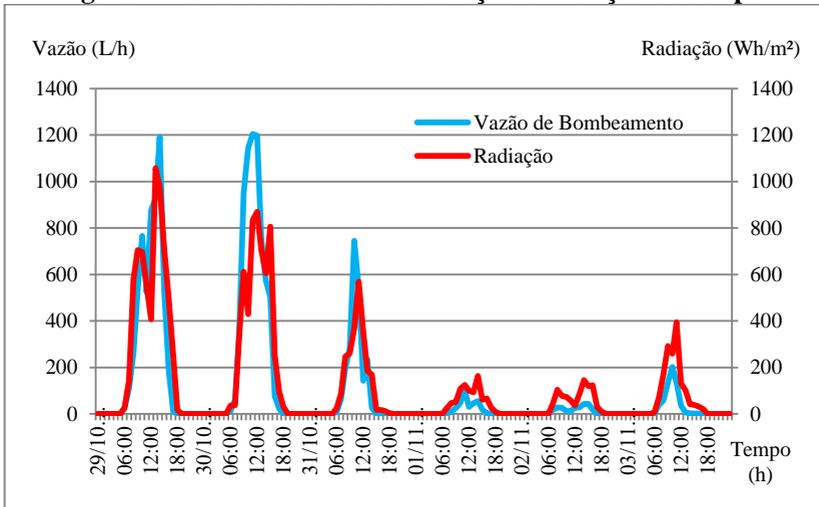
A diferença entre os valores pode ser apontada para a evolução técnica e econômica dos equipamentos associados. Há bombas disponíveis no mercado para atendimento de grande vazão e profundidade. Entretanto, em regiões com relevo acidentado, novos bombeamentos podem ser necessários afim de mandar água para outros locais. Essa situação eleva os gastos e pode inviabilizar a adoção desse sistema. Assim, o bombeamento fotovoltaico é mais indicado para locais com relevo plano.

5.3 VARIAÇÃO DO VOLUME EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

Um aspecto de grande importância a ser considerado no dimensionamento de sistemas de bombeamento fotovoltaico, é a variação do volume bombeado em função das variações diárias e horárias da radiação solar, sobretudo quando se projeta um sistema sem banco de baterias, isso porque o consumo de água também é variável ao longo do dia, afetando diretamente a capacidade do reservatório.

A figura 22 ilustra o comportamento do sistema piloto, considerando a vazão de bombeamento, registrada no medidor de vazão, em função da radiação solar, coletada por meio de um piranômetro, instalado próximo dos painéis fotovoltaicos no mesmo plano de inclinação. Considerou-se um período de seis dias, igualmente aplicado por DJURIN (2011), com padrões distintos de radiação solar diária, de aproximadamente 1,0 a 6,6 kWh/ m^2 . O período indicado compreende o dia 29 de outubro a 03 de novembro de 2015.

Figura 22: Gráfico de vazão e radiação em função do tempo.



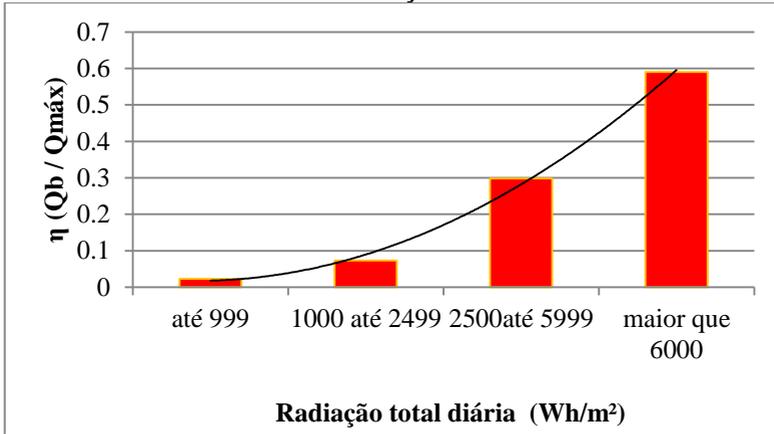
Conforme observado na figura 22, a vazão bombeada para o reservatório tem variação diretamente proporcional à radiação incidente no plano do painel fotovoltaico. Esta relação se torna mais clara na tabela 10.

A relação da vazão diária bombeada, Q_b , (com $H_m=10\text{m}$, duas bombas operando em paralelo, sob as condições locais de radiação), em função da vazão máxima dada pelo fabricante ($Q_{\text{máx}}=11.200$ litros/dia, mesmo tipo de associação de bombas, $H_m = 10\text{m}$, radiação de 6000 Wh/m^2), aumenta conforme o número de horas de sol pleno. A figura 23 ilustra o resultado, que evidencia o melhor rendimento do conjunto hidro energético em dias ensolarados, com 6 horas de sol pleno.

Tabela 10:Relação vazão de bombeamento pela vazão máxima.

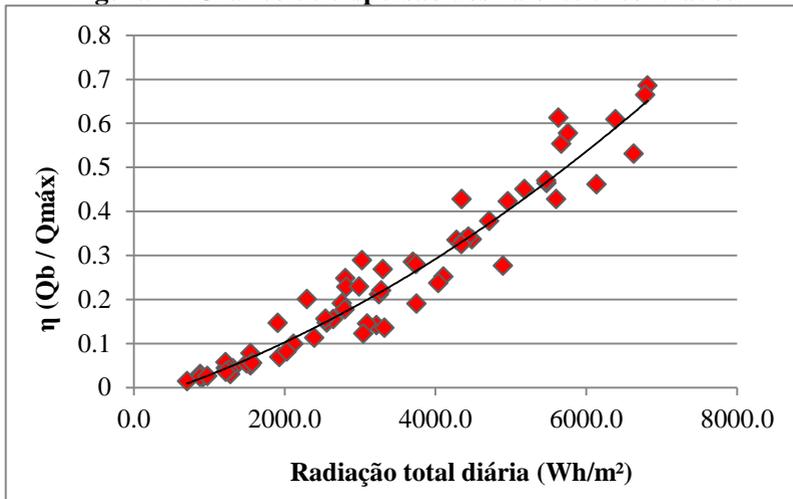
Data	Wh/m ² .d	L/d	Qb/Qm	Data	Wh/m ² .d	L/d	Qb/Qm
27/10	1315,5	479,	0,04	28/11	2026,8	906,7	0,08
28/10	4897,7	3097	0,28	29/11	4377,8	3742,	0,33
29/10	6630,2	5942	0,53	30/11	4104,2	2814,	0,25
30/10	5633,2	6855	0,61	1/12	4484,2	3760,	0,34
31/10	2295,6	2243	0,20	2/12	705,3	155,1	0,01
1/11	882,9	339,	0,03	3/12	3749,9	2125,	0,19
2/11	915,8	255,	0,02	4/12	3043,0	1369,	0,12
3/11	1565,9	618,	0,06	5/12	4437,6	3828,	0,34
4/11	881,3	266,	0,02	6/12	1497,6	602,7	0,05
5/11	1222,7	491,	0,04	7/12	2805,6	2771,	0,25
6/11	1281,8	335,	0,03	8/12	6387,4	6813,	0,61
7/11	1908,8	1637	0,15	10/12	1216,3	637,1	0,06
8/11	3216,2	1576	0,14	11/12	5471,2	5262,	0,47
9/11	5179,7	5042	0,45	12/12	4344,2	3643,	0,33
10/11	3703,8	3193	0,29	13/12	5602,0	4784,	0,43
11/11	3094,2	1622	0,14	14/12	2799,6	1982,	0,18
12/11	3025,5	3233	0,29	16/12	2818,1	2552,	0,23
13/11	1547,0	552,	0,05	17/12	5759,8	6462,	0,58
14/11	4280,2	3748	0,33	18/12	4039,8	2654,	0,24
15/11	6814,9	7678	0,69	19/12	1259,7	440,7	0,04
16/11	3305,3	3006	0,27	20/12	1222,1	393,7	0,04
17/11	3250,8	2367	0,21	21/12	2392,6	1261,	0,11
18/11	5671,6	6194	0,55	22/12	4960,7	4730,	0,42
19/11	6135,6	5160	0,46	23/12	3284,0	2464,	0,22
20/11	5474,1	5200	0,46	24/12	1547,4	866,8	0,08
21/11	6783,4	7442	0,66	25/12	1569,4	618,8	0,06
22/11	4347,1	4790	0,43	26/12	3322,7	1515,	0,14
23/11	975,5	286,	0,03	27/12	2646,6	1739,	0,16
24/11	1932,2	769,	0,07	28/12	2989,9	2563,	0,23
25/11	2115,9	1104	0,10	29/12	2542,3	1746,	0,16
26/11	2559,1	1642	0,15	30/12	3740,9	3135,	0,28
27/11	2758,0	2139	0,19	31/12	4714,3	4234,	0,38

Figura 23: Rendimento do conjunto hidro energético em função da radiação.



A figura 24 exibe o gráfico de dispersão e linha de tendência no período. O valor de R^2 encontrado foi de 0,9348.

Figura 24: Gráfico de dispersão dos valores encontrados.



Para averiguar a correlação entre os postos das 2 variáveis, utilizou-se a correlação de Spearman, conforme equação 1:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2-1)} \quad (1)$$

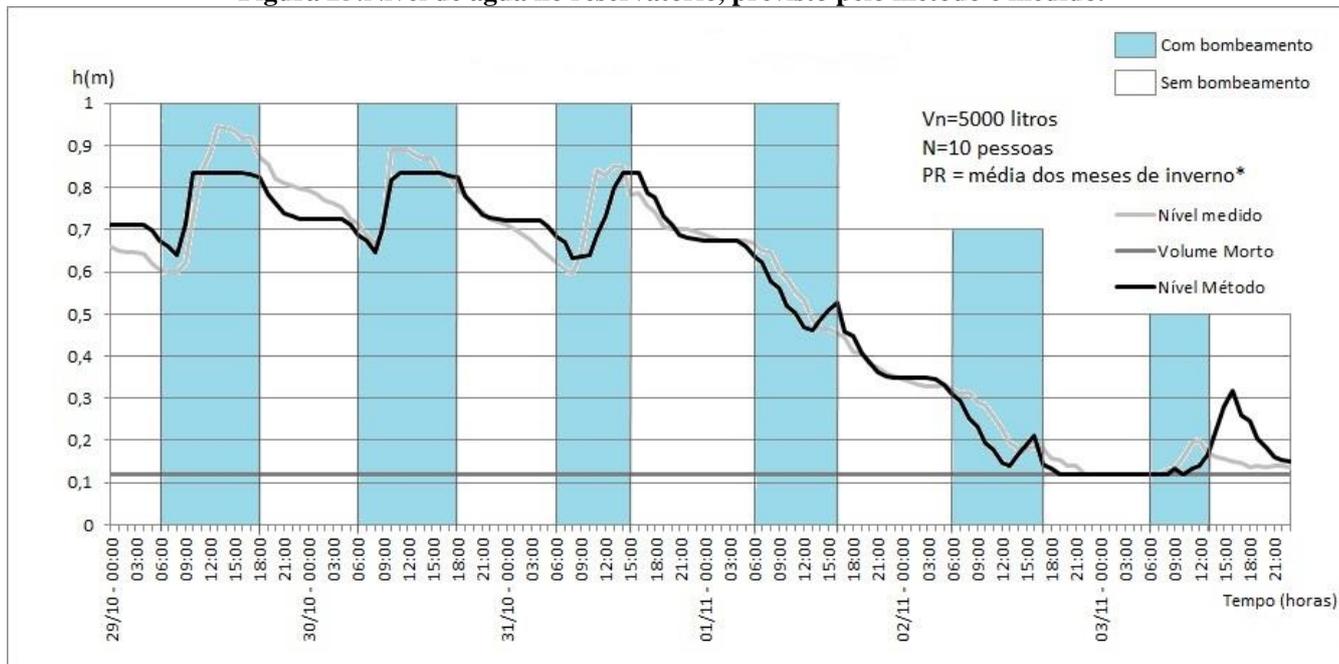
n = número de amostras;

d = desvio padrão.

Após proceder, com a análise estatística, o valor encontrado de foi $\rho = 0,959$. O valor encontrado expressa uma boa correlação positiva, com os postos das duas variáveis, radiação total diária (Wh/m².dia) e rendimento da bomba (Qb/Qmáx). Adicionalmente, confirma-se a hipótese de base do método, a de que quanto maior a radiação incidente em um dado local, maior será o volume bombeado, corroborando estudos anteriores (MOREIRA, 2009; NOGUEIRA 2013).

Para exemplificar a aplicabilidade do método, foi realizada uma simulação, ilustrada na figura 25, nas seguintes condições: atendimento a 10 pessoas, padrão de radiação solar da média dos meses de inverno, volume nominal de 5 mil litros e altura do volume morto de 0,12 m.

Figura 25: Nível de água no reservatório, previsto pelo método e medido.



Conforme observado na figura 20, nota-se que em alguns momentos existe maior aderência entre o nível previsto pelo método e o medido, e em outras ocasiões menos. Nos períodos com bombeamento, a diferença pode ser explicada pelo fato de, no método, em cada intervalo de meia hora, a radiação ser considerada constante, o que dificilmente acontece. Já nos períodos em que não há bombeamento, a diferença pode ser associada ao consumo, medido (variável) e registrado pelo método (fixo/constante).

O período avaliado foi de outubro a novembro, 2015, ao invés dos meses de inverno, conforme descrito em PINHO e GALDINO, (2014), em virtude de ter sido observada as menores médias registradas de radiação solar diária na região. O mês de outubro apresentou a maior precipitação mensal (313 mm), e a menor radiação anual (2946 Wh/m²). A forte influência do El Niño no hemisfério Sul pode ser uma das causas da anomalia observada nos padrões de radiação.

Após o processo de otimização, o método indica o volume do reservatório necessário, considerando, entre outros aspectos, o número de dias de autonomia. DJURIN (2011) considera 2 (dois) dias como um valor muito aceitável. O método não incorpora a informação da existência ou não de reservatório nas residências, contudo essa prática é bastante comum no Brasil. Isso pode significar um fator de segurança sobre o sistema dimensionado, na prática, um dia a mais de autonomia, se todos os reservatórios estiverem cheios no início de um período de baixa radiação.

5.4 CENÁRIOS

Para exemplificar o processo de otimização do método são construídos cinco cenários com variações nas condições diárias de radiação solar (chuvoso, nublado, nublado com sol e ensolarado), e no número de pessoas (N) atendidas. Por conveniência, adotou-se nos cálculos, o consumo per capita (q) da região de estudo – q=245,2 L/hab.d). Adiante são feitas considerações acerca desse valor de consumo per capita adotado. Para ilustrar o comportamento e autonomia do sistema nos diferentes cenários, construíram-se gráficos do volume remanescente no reservatório. Para efeito de comparação, definiu-se N=10 pessoas como referência.

As tabelas 11 e 12 demonstram as configurações dos subsistemas existentes na base de dados do método, além dos respectivos custos.

Tabela 11: Códigos e parâmetros dos respectivos conjuntos (bomba + painel).

Código	Potências (Bomba[W] Painéis [Wp])	Hm [m]	máx Qmín [m ³ /dia]	Hm [m]	mín Qmáx [m ³ .dia]	Preço [R\$]
1	100W - 100Wp	40	0,65	0	4,6	1900
2	100W - 180Wp	40	1,2	0	8,6	2200
3	600W - 735Wp	100	3	30	13	6600
4	600W - 810Wp	30	13	10	20	6600
5	1500W-2240Wp	60	20	40	40	15000
6	2200W-3240Wp	50	40	20	60	20500
7	3000W-4590Wp	60	40	40	60	26800

Tabela 12: Custos de diversas configurações de sistemas (bomba+painel+poço).

Código	Quantidade	Qd (m³/h)	Custo Poço Escavado	Custo Poço Tubular	Poço Escolhido	Custo (bomba+ painel)	Custo (Bomba+Painel+Poço)
1	1	1,0409	6000	25000	E	1900	7900,00
2	1	1,0409	6000	25000	E	2200	8200,00
3	1	1,0409	6000	25000	E	6600	12600,00
4	1	1,0409	6000	25000	E	6600	12600,00
5	1	1,0409	6000	25000	E	15000	21000,00
6	1	1,0409	6000	25000	E	20500	26500,00
7	1	1,0409	6000	25000	E	26800	32800,00
2	2	0,5204	11000	45000	E	4400	15400,00
4	2	0,5204	11000	45000	E	13200	24200,00
4	3	0,3469	16000	65000	E	19800	35800,00
3	2	0,5204	11000	45000	E	13200	24200,00
3	3	0,3469	16000	65000	E	19800	35800,00
2	3	0,3469	16000	65000	E	6600	22600,00
6	2	0,5204	11000	45000	E	41000	52000,00
7	2	0,5204	11000	45000	E	53600	64600,00

Tabela

Cenário 1		
Dia	FS - Fator Sol	Condição
1	0,71	Sol c/ nuvens
2	0,17	Chuvoso
3	0,71	Sol c/ nuvens
4	0,42	Nublado
5	1	Sol
6	0,42	Nublado

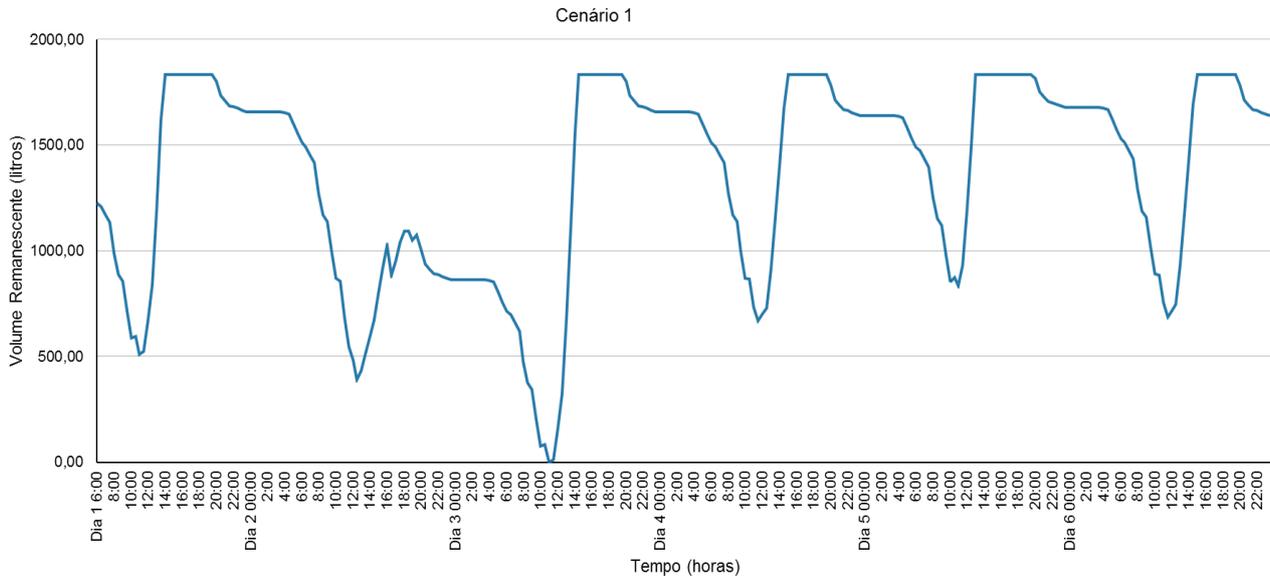
13:Otimização do sistema de acordo com o cenário 1.

Pessoas	Hg (m)	V reservatório (L)	Vazão fabricante (L/dia)	Código bomba	Tipo de poço	Quantidade	Custo Total (R\$)
5	10	1098,26	6500	2	E	1	8406,28
10	10	2840,01	6500	2	E	1	9192,99
50	20	12858,63	32400	4	E	2	29749,93
100	20	35665,32	32400	4	E	2	39890,32
250	40	71989,04	118500	7	E	2	130126,12

A tabela 13 apresenta as configurações dos subsistemas (bomba+painel), volume do reservatório, e respectivos custos envolvidos para cada as condições estabelecidas, referentes ao número de pessoas atendidas, vazão do fabricante e altura manométrica. Essa tabela serve como base de comparação junto aos demais cenários. A figura 26 ilustra o comportamento do volume remanescente no reservatório considerando o atendimento a 10 pessoas, conforme condições regidas pelo cenário 1.

O cenário 1 se inicia em um dia nublado com sol, que permite encher o reservatório. Na sequência, um dia chuvoso ocasiona a queda do volume remanescente para o seu valor mínimo ($V=1$ litro). No terceiro dia, a partir do meio-dia (sol de pico), o sistema começa a se recuperar atingindo o volume máximo em todos os dias subsequentes.

Figura 26: Simulação do volume remanescente para atendimento a 10 pessoas - cenário 1.



Cenário 2		
Dia	FS - Fator Sol	Condição
1	0,17	Chuvoso
2	0,42	Nublado
3	1	Sol
4	0,17	Chuvoso
5	0,17	Chuvoso
6	1	Sol

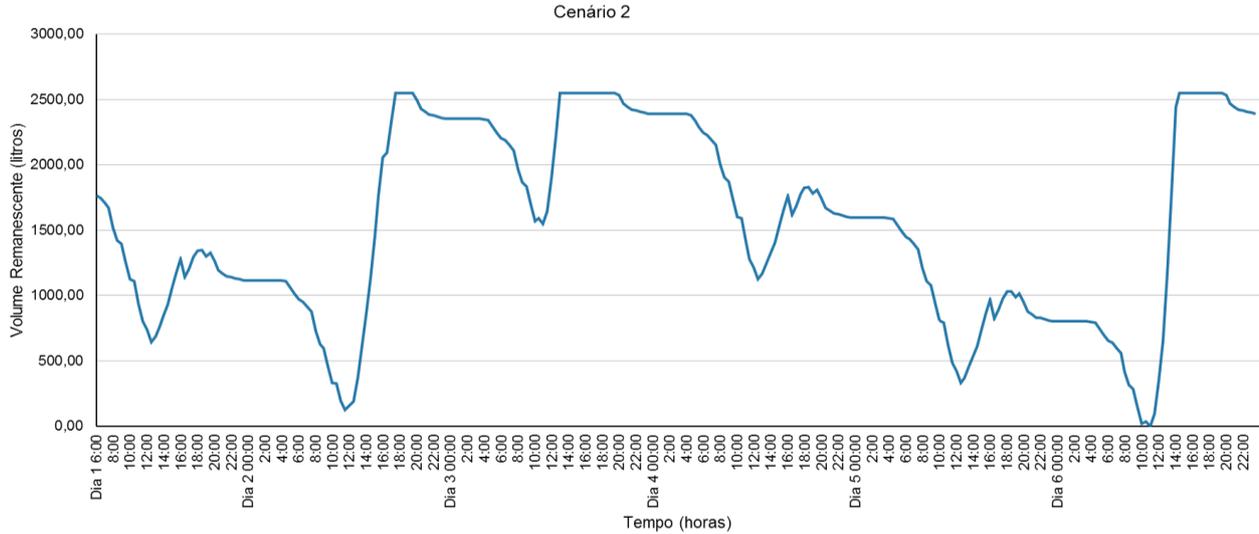
Tabela 14: Otimização do sistema de acordo com o cenário 2.

Pessoas	Hg (m)	V reservatório (L)	Vazão fabricante (L/dia)	Código bomba	Tipo de poço	Quantidade	Custo Total (R\$)
5	10	1241,87	6500	2	E	1	8471,19
10	10	3853,43	6500	2	E	1	9650,29
50	20	17114,73	32400	4	E	2	31654,78
100	20	35796,15	59400	6	E	1	61216,42
250	40	104099,78	118500	7	E	2	143755,29

Conforme exposto pela tabela 14, os subsistemas (bomba+painel) são idênticas ao cenário 1, porém com maior volume de reservatório, devido as condições de radiação piores. Todavia, para N=100, recomenda-se um subsistema com maior potência com o volume de reservatório constante. A figura 27 mostra o volume remanescente no reservatório para atendimento a 10 pessoas, conforme condições do cenário 2.

O cenário 2 é iniciado em um dia chuvoso, seguido por um dia nublado, o que leva a uma queda brusca no volume do reservatório. Na sequência, um dia ensolarado permite o sistema se recuperar, e ficar resiliente a dois dias de chuva. Apesar de atingir o nível mínimo do reservatório, o sistema recupera-se logo em seguida. Para atender a demanda, o volume do reservatório é aumentado, ainda que o conjunto hidro energético permaneça o mesmo.

Figura 27: Simulação do volume remanescente para atendimento a 10 pessoas - cenário 2.



Cenário 3		
Dia	FS- Fator Sol	Condição
1	0,71	Sol/Nublado
2	0,42	Nublado
3	0,71	Sol/Nublado
4	0,42	Nublado
5	0,71	Sol/Nublado
6	0,42	Nublado

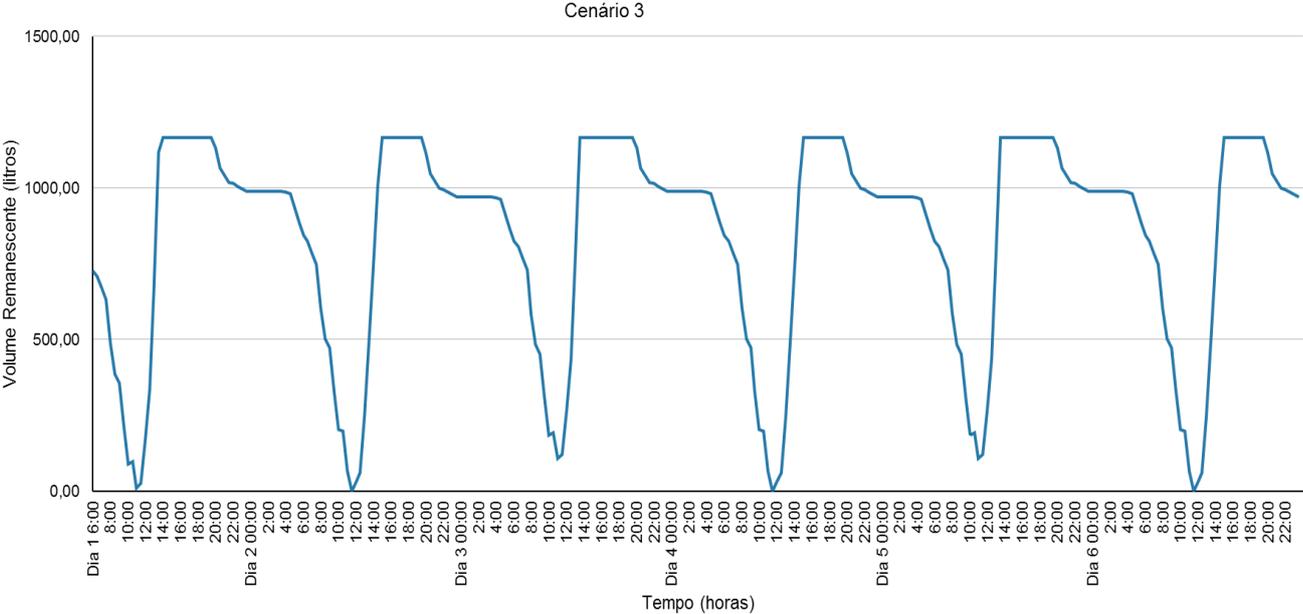
Tabela 15: Otimização do sistema de acordo com o cenário 3.

Pessoas	Hg (m)	V reservatório (L)	Vazão fabricante (L/dia)	Código bomba	Tipo de poço	Quantidade	Custo Total (R\$)
5	10	1009,00	6500	2	E	1	8365,89
10	10	1900,95	6500	2	E	1	8768,96
50	20	8462,08	32400	4	E	2	27776,20
100	20	20706,31	32400	4	E	2	33257,76
250	40	39687,51	118500	7	E	2	116086,81

Conforme a tabela 15, as configurações dos subsistemas são as mesmas do cenário 1 para todos os casos. Entretanto, por apresentar dias com melhores perfis de radiação solar, os volumes de reservatório são menores no cenário 3. A figura 28 mostra o volume remanescente no reservatório para atendimento a 10 pessoas, conforme condições do cenário 3.

O cenário 3 é marcado por dias nublados alternados com dias nublados com sol. Nota-se a grande oscilação no volume remanescente, atingindo o volume máximo em todo o período e o mínimo em quatro ocasiões, respectivamente, na condição inicial do reservatório e nos três dias nublados.

Figura 28: Simulação do volume remanescente para atendimento a 10 pessoas - cenário 3.



Cenário 4		
Dia	FS- Fator Sol	Condição
Dia 1	1	Sol
Dia 2	0,71	Sol/Nublado
Dia 3	1	Sol
Dia 4	0,71	Sol/Nublado
Dia 5	1	Sol
Dia 6	0,71	Sol/Nublado

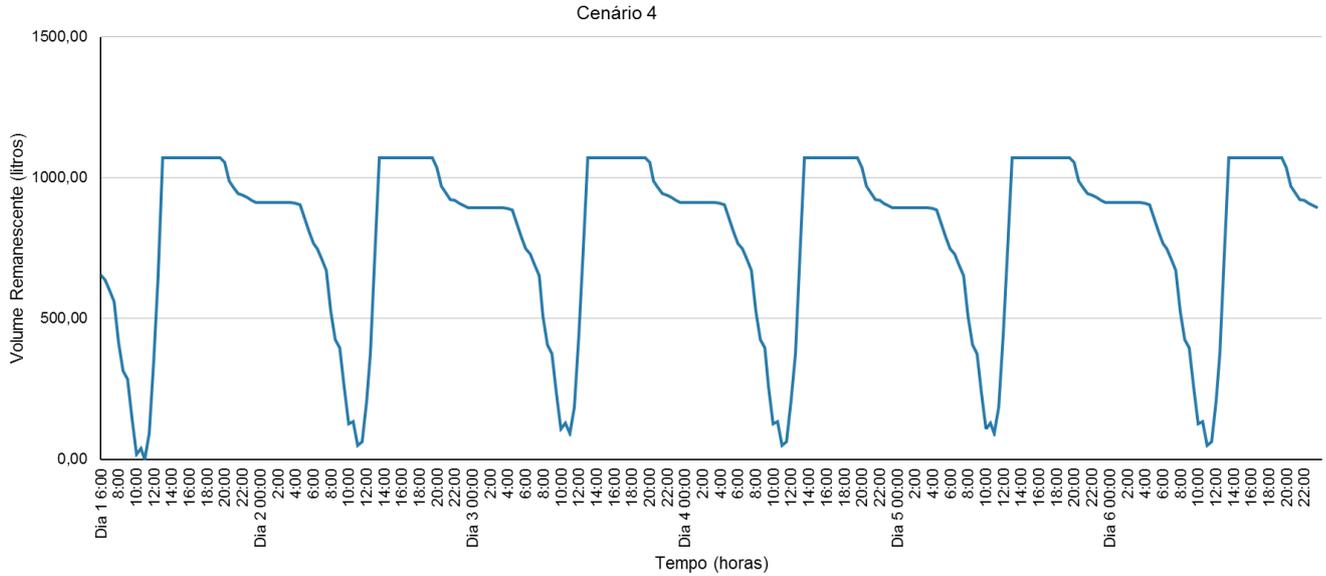
Tabela 16: Otimização do sistema de acordo com o cenário 4.

Pessoas	Hg (m)	V reservatório (L)	Vazão fabricante (L/dia)	Código bomba	Tipo de poço	Quantidade	Custo Total (R\$)
5	10	1007,53	6500	2	E	1	8365,28
10	10	1767,68	6500	2	E	1	8708,76
50	20	9167,86	16150	4	E	1	16455,00
100	20	15516,20	48600	4	E	3	42596,42
250	40	42225,17	59200	7	E	1	70344,91

O cenário 4 apresenta as melhores condições de radiação. Conforme exposto pela tabela 16, em todos os casos, encontram-se os menores valores referentes ao volume de reservatório. Para N=50; 100; 250, necessita-se de um conjunto hidro energético com menor potência. Para N=5; 10, o subsistema é idêntico aos cenários anteriores. A figura 29 exibe o volume remanescente no reservatório para atendimento a 10 pessoas, conforme as condições do cenário 4.

Conforme a figura 29, o volume remanescente alcança o valor mínimo apenas no primeiro dia. Entretanto, no mesmo dia, o sistema consegue se recuperar graças ao período de sol pleno. Nos dias subsequentes atinge o volume máximo do reservatório em todas as ocasiões.

Figura 29: Simulação do volume remanescente para atendimento a 10 pessoas - cenário 4.



Cenário 5	
Dia	FS- Fator Sol
Dia 1	0,71
Dia 2	0,17
Dia 3	0,17
Dia 4	0,42
Dia 5	0,17
Dia 6	0,42

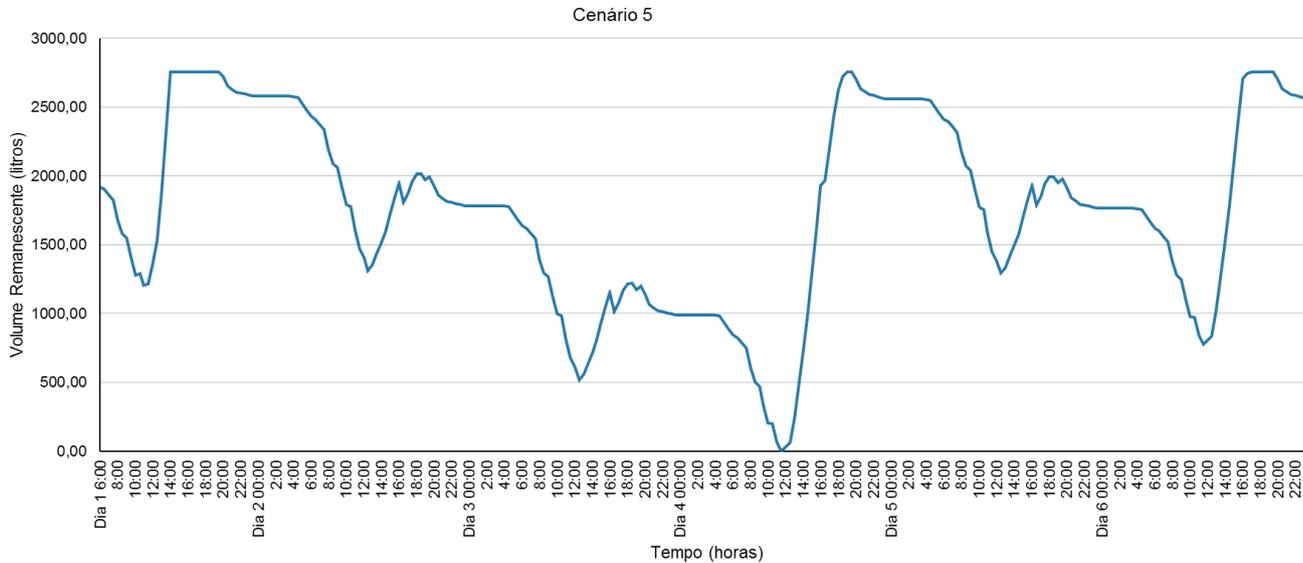
Tabela 17: Otimização do sistema de acordo com o cenário 5.

Pessoas	Hg (m)	V reservatório (L)	Vazão fabricante (L/dia)	Código bomba	Tipo de poço	Quantidade	Custo Total (R\$)
5	10	1141,21	6500	2	E	1	8425,70
10	10	4145,62	6500	2	E	1	9782,53
50	20	18260,68	32400	4	E	2	32166,00
100	20	38277,34	59400	6	E	1	62309,58
250	40	131518,22	118500	7	E	2	155134,63

O cenário 5 apresenta as piores condições de insolação, com nenhum dia de sol e três dias chuvosos. Consequentemente, os custos em todas as situações são os maiores verificados. Assim, os reservatórios possuem o maior volume e os conjuntos hidro energéticos a maior potência instalada. Novamente para N=5;10 o subsistema conta com as mesmas configurações dos cenários anteriores.

Conforme a figura 30 verifica-se que o sistema se mostrou resiliente, apesar das condições adversas. Mesmo mantendo as configurações do subsistema (bomba+painel) dos cenários anteriores, o sistema atingiu o volume máximo do reservatório três vezes.

Figura 30: Simulação do volume remanescente para atendimento a 10 pessoas - cenário 5.



6 CONCLUSÃO

O conhecimento sobre o padrão de consumo de água e o perfil de radiação solar de uma determinada localidade é fundamental para o dimensionamento adequado de sistemas de bombeamento fotovoltaico. Não menos importante é definir e equacionar os diversos componentes de um sistema: módulos fotovoltaicos, bombas e reservatórios.

O método proposto, nas simulações apresentadas, buscou trabalhar com cenários conservativos, adotando fatores de segurança que asseguram a resiliência do sistema, além de valores de consumo per capita (q) igual ao da propriedade do sistema piloto ($q=245,2$ L/hab.dia), onde não há hidrômetro. Verifica-se que em localidades sem medição de água, o consumo geralmente é maior. Assim, os valores de consumo per capita, citados na literatura equivalem, aproximadamente, a metade do utilizado.

Com base no estudo apresentado, conclui-se que, o método se mostrou apropriado para a simulação de desempenho de um sistema piloto de bombeamento fotovoltaico. Através do fornecimento dos dados de radiação solar e padrão de consumo de água, torna-se possível estabelecer uma solução otimizada para um determinado sistema, considerando a capacidade do reservatório. É fundamental considerar as variações no sistema de bombeamento em função da radiação solar para esse propósito.

Diante das condições ensaiadas em diferentes períodos críticos de radiação solar e número de pessoas atendidas, o método se mostrou eficiente. A simulação efetuada nas condições do sistema piloto apresentou diferença percentual de 0,98% menor do que o comportamento monitorado, quanto ao nível de água no reservatório.

Cabe ressaltar que o método possui algumas limitações como: a aleatoriedade dos dados de radiação solar, considerados constantes no método e variáveis na realidade. Tal diferença influencia no volume de bombeamento registrado pelo método e medido. Outra limitação é a utilização conjunta de bombas e painéis fotovoltaicos, restringindo uma avaliação mais precisa em torno dos custos específicos de cada componente. Uma sugestão para futuros trabalhos é analisar cada componente separadamente.

Os resultados das experimentações, após análises, apresentam uma visão futura do sistema. As informações geradas auxiliam nas tomadas de decisão, necessárias no momento presente, e contribuem para uma melhor compreensão do sistema a ser implantado.

7 REFERÊNCIAS

ABES, 2009. Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água/ Ricardo Franci Gonçalves (coordenador). Rio de Janeiro. Projeto PROSAB.

AÇOMAC, 2015. Disponível em: <<http://www.acomac.ind.br/>> Acesso em novembro de 2015.

ALIGAH, 2011. Design of Photovoltaic Water Pumping System and Compare it with Diesel Powered Pump. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. Volume 5, Number 3, June 2011

ALTENER, 2004 - “Energia Fotovoltaica - Manual sobre tecnologias, projecto e instalação”, Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf> > Acesso em 15/10/2015.

APOGEE Instruments. (s.d.). SP-110, Data Sheet. 2015

ANAUGER - Disponível em <<http://www.anauger.com.br/index.php/linha-anauger-solar/anauger-solar-p100>> Acesso em janeiro de 2015.

ANEEL, 2005 - Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica. 2ª edição - Brasília; ANEEL, 2005, 243p.

ANEEL, 2012 - Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL – Resolução Normativa nº 482, de 17 de Abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de micro geração e mini geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA). Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2012. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014. 164 p.

BEN, 2011 – Balanço Energético Nacional, 2011 – Ano Base 2010.

CAMPANA, 2013 - Dynamic modelling of a PV pumping system with special consideration on water demand. Pietro Elia Campana; Hailong Li; Jinyue Yan.

CELESC, 2015. Centrais Elétricas de Santa Catarina. Planilhas eletrônicas dos Módulos de Rede para elaboração de programas da Eletrobrás – “Luz Pra Todos”.

CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito. Energia Solar: Princípios e Aplicações. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_solar.pdf. Acesso em 01 de março de 2015.

DJURIN, B.; MARGETA J.; GLASNOVIC, Z. PV Power for Urban Water Supply. *International Journal of Energy Science*, v.1, n.3, 2011, p. 131-139.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética – Leilão de Fontes Alternativas, 2013.

FEDRIZZI, Maria Cristina. Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: lições apreendidas e procedimentos para potencializar sua difusão. 174 p., 2003. Tese (Doutorado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo.

FEDRIZZI, Maria Cristina, BRITO, Alaan Ubaiara e ZILLES, Roberto. Procedimento para averiguação operacional de sistemas fotovoltaicos de bombeamento. In: Encontro de energia no meio rural, v.5., 2004, Campinas. Proceedings online... Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022004000200036&lng=en&nrm=abn>. Acessado em: 02 de fevereiro de 2016.

GAD, H.E. Performance prediction of a proposed water pumping system at South Sinai, Egypt climate conditions. In: *Proceedings of the thirteenth international water technology conference*. Hurgada, Egypt; 2009, p. 739-52.

GHONEIM, 2005 - Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems. Energy Conversion and Management. A.A. Ghoneim

GOMES, A. S. - Seminário Gestão do uso da Energia Elétrica no Saneamento: Importância e Dimensões do Problema – Rio de Janeiro, março 2013.

HADJ ARAB, A.; CHENLO, F.; MUKADAM, K.; BALENZATEGUI, J.L. Performance of PV water pumping systems. *Renew Energy* v.18, 1991, p.191-204.

HELLER, L. PÁDUA, V.L., 2006 – Abastecimento de água para consumo humano / Léo Heller, Valter Lúcio de Pádua (organizadores). – Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.

HIRATA, R. C. A.; Zoby, J. L. G.; Oliveira, F. R. Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial. In: BICUDO, Tundisi, Scheuenstuhl (orgs.). Águas do Brasil: análises estratégicas. Cap. IX, 2010, p. 149-161.

IBGE, 2011. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro. 2011.

IBGE. PNAD – Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio.(2012). Disponível

<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2011/default.shtm>>. Acesso em 10 de agosto de 2014.

IEA. International Energy Agency – World Energy Outlook 2015. Energy for All: Financing Access for Poor, 2015.

INCONTROL, 2016 – Disponível em: <<http://www.incontrol.ind.br>> ; Acesso em 15 de fevereiro de 2016.

INICIATIVA VERDE, 2014 - Disponível em: <<http://www.iniciativaverde.org.br/calculadora/index.php>

JACOBSON, M., DELUCCHI, 2011 – “Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials.” Energy Policy. V.39, p 1170-1190. 2011

KYOCERA, 2016 – Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5133.pdf>> Acesso em fevereiro de 2016.

LOXSOM, F.; VEROJ, P.D. Estimating the performance of a photovoltaic water pumping system. *Sol Energy*, v. 52, 1994, p.215–9.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em: http://mct.gov.br/index.php/content/view/72764/Fatores_de_Emissao_d_e_CO_sub_2_sub_pela_geracao_de_energia_eletrica_no_Sistema_Integrado_Nacional_do_Brasil.html

MME, 2013 - Plano Decenal de Expansão de Energia 2023 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2014.

MOHANLAL, K.; JOSHI, J.C.; KOTHARI, D.P. Performance analysis of a direct coupled photovoltaic water pumping system. *IEEE Trans Energy Convers*, v.19, n.3, 2004.

MOREIRA, 2009. Moreira, Carlos Alberto Machado, Avaliação do desempenho hidro-energético de sistemas fotovoltaicos utilizados no bombeamento de água / Carlos Alberto Machado Moreira. – Botucatu : [s.n.], 2009.

NOGUEIRA *et al*, 2013. Nogueira, C.; Nogueira, H.m.; Garcia, F.T.; LOPES, L.F. – *Engevista* V.15, n.2, p.125-137, agosto 2013.

ONU – Organizações das Nações Unidas. The Millennium Development Goals Report 2015. Disponível em: [http://www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20rev%20\(July%201\).pdf](http://www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20rev%20(July%201).pdf) ; Acesso em 05 de novembro de 2015.

ORLEANS. Prefeitura Municipal de Orleans. 2013 Disponível em <<http://orleans.sc.gov.br/2013/>>. Acesso em: 18 nov 2015.

PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S.L.; RÜTHER, R. *Atlas brasileiro de energia solar*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2006, 60p. http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf.

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A.; *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Grupo de Trabalho de Energia Solar - GTES, CEPEL - CRESESB, Rio de Janeiro, 2014, 530p.

PILLAI, I.R.; BANERJEE, R., 2009 - *Renewable energy in India: Status and potential*. *Energy*, 2009, vol. 34, issue 8, pages 970-980

PORTOLAN, I. RUTHER. R, 2014 - “Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil”.

REBOUÇAS, A. C. Groundwater in Brazil. *Episodes*, v. 11, p 209-214, 1988.

REN21. 2013. *Renewables Global Futures Report* (Paris: REN21).

REN, 2014. *Renewables Global Futures Report* (Paris: REN21).

SEBRAE. Santa Catarina em Números - Orleans, 2010. 115p. Disponível em: <<http://www.sebrae-sc.com.br/scemnumero/arquivo/Orleans.pdf>> Acesso em 10 de novembro de 2015.

SINAPI. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil Disponível em: <em: <https://sinapiexcel.wordpress.com/2016/>>. Acesso em 07 de março de 2016;

SNIS. 2010. Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento.

SOLARTERRA - Disponível em <<http://solarterra.com.br/pdf/curso-energia-solar-fotovoltaica.pdf>> Acesso em fevereiro de 2015.

SOLINST – Disponível em: <<http://www.solinst.com/products/data/3001gold.pdf>> Acesso em fevereiro de 2015.

SONDA – Serviço de Organização Nacional de Dados Ambientais. INPE, 2014. Disponível em:<<http://sonda.ccst.inpe.br/infos/index.html>>

SUASSUNA, J. - Transposição de águas do rio São Francisco: planejar é preciso. Fundação Joaquim Nabuco, 2001.

TIBA, C., FRAIDENREICH, N., BARBOSA E. M. DE S. Instalação de sistemas fotovoltaicos para residências rurais e bombeamento de água. Texto para curso de instalador de sistemas fotovoltaicos. Versão 2.0. 1998.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change - Methodological Tool approved by CDM Executive Board – " Tool to calculate the emission factor for an electricity system". Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/.../tools/am-tool-07-v4.0.pdf>. Acesso em 10 de Agosto de 2014;

UNITED NATIONS, 2015 - Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development.<<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>>

WAGDY, R.; NORB, M.A. Optimum design of a photovoltaic powered pumping system. *J Power Sources*, v. 50, 1994, p. 1-9.

URBANETZ, J.; ZOMER D.C.; RUTHER, R., 2011 - Compromises between form and function in grid-connected, building integrated photovoltaics (BIPV) at low-latitude sites. 2011

WHO (2012) - Global costs and benefits of drinking-water supply and sanitation interventions to reach the MDG target and universal coverage. Geneva, World Health Organization. Disponível: <http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2012/globalcosts.pdf> Acesso: 29 de janeiro de 2016.

WHO/UNICEF (2014) Progress on drinking-water and sanitation – 2014 update. Geneva, World Health Organization.

WHO, 2014. *Preventing diarrhoea through better water, sanitation and hygiene*. World Health Organization, Geneva.

WILCOX, S. GUEYNARD, C. 2009. Wilcox, S., Gueymard, C., Spatial and Temporal Variability in the Solar Resource. Buffalo, NY: AmericanSolar Energy Society, May 2009. Print.

ANEXO A

Módulo Solar Yingli

Dados elétricos

Potência máxima (W)	175	180	185
Tensão de potência ideal (Vmp) (V)	38,04	38,47	38,78
Corrente de operação ideal (Imp) (A)	4,60	4,68	4,77
Tensão de circuito aberto (Voc) (V)	45,17	45,60	45,90
Corrente de curto circuito (Isc) (A)	4,92	5,01	5,10
Eficiência de conversão fotoelétrica da célula solar (%)	16,48	16,95	17,42
Eficiência de conversão fotoelétrica do módulo completo (%)	13,71	14,10	14,49
Tolerância de potência	0% a +3%		
Temperatura nominal de operação da célula nominal (°C)	47±2		

Características de temperatura

Coeficiente de temperatura de Isc (%)	+0,04
Coeficiente de temperatura de Voc (%)	-0,35
T Coeficiente de temperatura de Pm (%)	-0,45
Coeficiente de temperatura de Im (%)	+0,04
Coeficiente de temperatura de Vm (%)	-0,35

Componentes e parâmetros técnicos

Célula solar (mm)	Tipo 125×125 monocristalino
Número de células (pcs)	6×12
Tamanho do módulo (mm)	1580×808×40
Espessura do vidro frontal (mm)	3,2
Capacidade máxima de carga da superfície (Pa)	2400-5400
Carga de granizo permitida	23m/s, 7,53g
Peso por peça (kg)	15
Tipo de caixa de derivação	Certificação de TUV
Avaliação do diodo de contorno (A)	12
Tipo de conector e cabo	Certificação de TUV
Moldura	40mm liga de alumínio
Folha traseira	TPT
Gama de temperatura (°C)	-40 a +85
Factor de enchimento (%)	70-76
Condições de teste padrão	AM1.5, 1000W, 25±2°C

ANEXO B

Painel Solar Kyocera 250 W

Condições Padrões de Teste*(CPT):

Potência máxima (Pmax): 250Wp

Tolerância: +5%/-3%

Tensão em circuito aberto (Voc): 36,9V

Tensão de Pico (Vmpp): 29,8V

Corrente de curto-circuito (Isc): 9,09A

Corrente de Pico (Impp): 8,39A

Voltagem máxima do sistema: 1000V

Tipo de célula: Silício Policristalino

Dimensões painel: 1662 x 990 x 46 (mm)

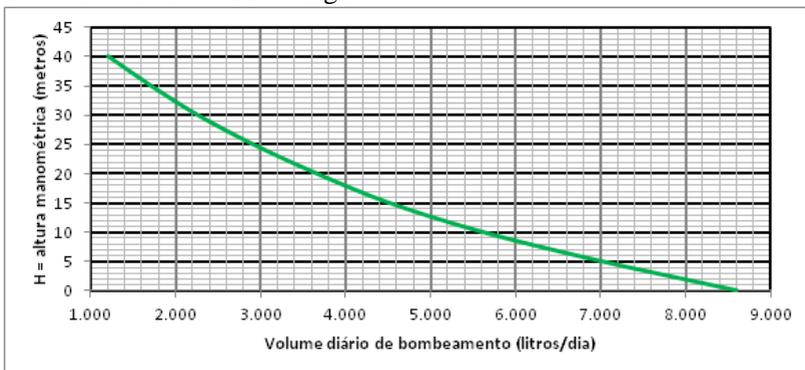
Moldura: Alumínio

Peso: 20 kg

*CPT: Irradiação de 1000W / m², Espectro de Massa de Ar 1.5 e Temperatura de Célula de 25°C

ANEXO C

Curva da Bomba P100 Anauger



APÊNDICE 1

Questionário aplicado aos moradores

CONSUMO DE ÁGUA PARA PROPRIEDADES RURAIS

Caracterização da propriedade e das instalações hidráulico prediais

Proprietário?

Área da propriedade? Área da casa/pastagem/lavoura?

Quantas pessoas moram na casa?

Tem caixa d'água? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

Quantas caixas d'água e volume?

Quais pontos cada caixa abastece?

Tem abastecimento direto? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

Quais e quantos pontos?

Número de chuveiros?

Número de privadas (bacia sanitária)?

Número de pias de banheiro?

Número de pias de cozinha?

Número de torneira de tanque?

Número de torneira de serviço?(externa)

Qual o horário de acordar/ dormir?

Qual o horário que mais gasta água?

Quantas refeições faz em casa?

Lava a louça que horas?

Lava a louça com a torneira aberta? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

Que horário costuma escovar os dentes?

Escova os dentes com a torneira aberta? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

Horário de banho?

Quantos banhos por dia?

Duração do banho?

Quantas vezes na semana/dia lava roupa?

Lava roupa normalmente que horas?

Tem máquina de lavar? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

Quantidade/modelo?(ex: 8 litros, médio)

Você usa água durante a noite/madrugada? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

Qual atividade? O que utiliza (equipamento)?

Qual horário?

O que utiliza para lavar calçada? (Marcar apenas uma oval)

Balde

Mangueira

Vap

Outro: _____

Quanto tempo demora/Quantos baldes (volume)/Marca vap?

Quantas vezes por dia ou semana?

Que horas ou parte do dia (ex: de manhã cedo ou final da tarde)?

O que você utiliza para lavar carro? (Marcar apenas uma oval)

Balde

Mangueira

Vap

Outro: _____

Quanto tempo demora/Quantos baldes (volume)/Marca vap?

Quantas vezes por dia ou semana?

Que horas ou parte do dia (ex: de manhã cedo ou final da tarde)?

O que utiliza para lavar alguma máquina ou equipamento de trabalho?
(Marcar apenas uma oval)

Balde

Mangueira

Vap

Outro: _____

Que tipo de máquina ou equipamento?

Quanto tempo demora/Quantos baldes (volume)/Marca vap?

Quantas vezes por dia ou semana?

Que horas ou parte do dia (ex: de manhã cedo ou final da tarde)?

Costuma irrigar o seu jardim? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

Quantas vezes por dia/semana?

Que horário?

O que utiliza? (Marcar apenas uma oval)

Regador

Balde

Mangueira

Outro: _____

Quantidade (volume)/quanto tempo ligado?

Costuma irrigar a sua horta? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

Quantas vezes por dia/semana?

Que horário?

O que utiliza? (Marcar apenas uma oval)

Regador

Balde

Mangueira

Outro: _____

Quantidade (volume)/quanto tempo ligado?

Como costuma irrigar a plantação? (Marcar apenas uma oval)

Naturalmente (Chuva)

Canalizada (caixa d'água)

Canalizada (direta)

Outro: _____

Qual equipamento é utilizado? Tipo/marca

Ocorre com frequência a utilização da irrigação não natural?

Tempo de duração/quantidade?(ex: 5 mangueiras)

Que horário?

Tem galinheiro? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

Precisa limpar o galinheiro? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

O que utiliza? (Marcar apenas uma oval)

Balde

Mangueira

Vap

Outro: _____

Tempo ou quantidade de baldes (volume)?

Qual o horário?

Comercializa ovos? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

Utiliza água com essa atividade? (Marcar apenas uma oval) () Sim

Não

O que utiliza? (Marcar apenas uma oval)

Balde

Mangueira

Outro: _____

Tempo ou quantidade de baldes (volume)?

Que horário?

Tem gado na sua propriedade? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

Quantos animais?

Utiliza água com esta atividade? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

O que utiliza? (Marcar apenas uma oval)

Balde

Mangueira

Vap

Outro: _____

Tempo ou quantidade de baldes (volume)?

Que horário?

Produz queijo? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

Utiliza água com esta atividade? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

O que utiliza? (Marcar apenas uma oval)

Balde

Mangueira

Outro: _____

Tempo ou quantidade de baldes (volume)?

Que horário?

Tem porcos? (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

Utiliza água com esta atividade? (ex: limpar curral, dar banho nos animais) (Marcar apenas uma oval)

Sim

Não

O que utiliza? (Marcar apenas uma oval)

Balde

Mangueira

Vap

Outro: _____

Tempo ou quantidade de baldes (volume)?

Que horário?

APÊNDICE 2

Dados e resultados do questionário aplicado na propriedade rural do sistema piloto.

Atividade	Modo	Cenário de Consumo	Volume per capita	Volume/Hora	Duração	Frequência		Horário		Consumo Horário	
								Nº Intervalos	Intervalo		
Escovar os dentes/ lavar a mão	Torneira com abertura controlada	baixo	9			3	x dia	3	7-8; 13-14; 20-21	15	
		médio	10,5							17,5	
		alto	12							20	
Tomar banho	Torneira com abertura controlada	baixo	30			1	x dia	2	18-19h, 19-20h	75	
		médio	60							150	
		alto	100							250	
Lavar louça/cozinhar	Torneira com abertura controlada	baixo	11,4			3	x dia	3	6-7; 12-13; 19-20	19	
		médio	15							25	
		alto	50							83,33	
Lavar roupa	Máquina de lavar	baixo	7			1	x dia	2	8h-10h	17,5	
		médio	15							37,5	
		alto	23,2							58	
Limpar a casa	Máquina VAP	baixo		6	15	min	1	x semana	6	8h-12h; 15h-17h	15
		médio		6	30						30
		alto		6	45						45

Atividade	Modo	Cenário de Consumo	Volume per capita	Volume/Hora	Duração		Frequência		Horário		Consumo Horário
									Nº Intervalos	Intervalo	
Limpar a calçada	Máquina VAP	baixo		6	15	min	2	x mês	2	9h-11h	45
		médio		6	30						90
		alto		6	45						135
Bacia Sanitária	-----	baixo	12				3	x dia	2	5h-6h; 20h-21h	20
		médio	24								40
		alto	40								66,67
Ordenhar as vacas	Balde (10L)	baixo		5			2	x dia	2	5h-6h; 17h-18h	2,5
		médio		10							5
		alto		20							10
Lavar os taros	50l cada taro	baixo		25			1	x dia	1	8h-9h	25
		médio		30							30
		alto		100							100
Lavar o carro	Mangueira	baixo		18,6	15	min	2	x mês	1	13h-14h	279
		médio		18,6	30						558
		alto		18,6	45						837
Irrigar a horta	Regador (10L)	baixo		30			1	x dia	1	17h-18h	30
		médio		60							60
		alto		90							90

APÊNDICE 3

Data	(Wh/n².dia)	30/06/2015	696,7	30/07/2015	5200,8
01/06/2015	3434,1	01/07/2015	2281,1	31/07/2015	5106,9
02/06/2015	4682,5	02/07/2015	1084,7	01/08/2015	4718,1
03/06/2015	5082,8	03/07/2015	4845,6	02/08/2015	6040,9
04/06/2015	4224,0	04/07/2015	6570,7	03/08/2015	3895,8
05/06/2015	3750,1	05/07/2015	5159,8	04/08/2015	3651,6
06/06/2015	4941,4	06/07/2015	5110,8	05/08/2015	2000,3
07/06/2015	5292,4	07/07/2015	531,8	06/08/2015	4966,2
08/06/2015	5171,1	08/07/2015	410,3	07/08/2015	6101,3
09/06/2015	3657,1	09/07/2015	2755,6	08/08/2015	5988,1
10/06/2015	5392,0	10/07/2015	4012,1	09/08/2015	6485,6
11/06/2015	329,5	11/07/2015	5169,6	10/08/2015	6510,2
12/06/2015	4607,9	12/07/2015	497,8	11/08/2015	6406,1
13/06/2015	392,8	13/07/2015	1275,6	12/08/2015	6114,7
14/06/2015	412,5	14/07/2015	199,3	13/08/2015	4767,9
15/06/2015	6668,5	15/07/2015	363,0	14/08/2015	3551,7
16/06/2015	6147,9	16/07/2015	879,1	15/08/2015	4675,7
17/06/2015	3141,1	17/07/2015	4765,2	16/08/2015	1217,3
18/06/2015	1182,9	18/07/2015	5770,2	17/08/2015	5442,5
19/06/2015	4805,5	19/07/2015	5129,1	18/08/2015	4597,4
20/06/2015	6078,1	20/07/2015	647,7	19/08/2015	5319,1
21/06/2015	1978,6	21/07/2015	5148,7	20/08/2015	1526,1
22/06/2015	4217,2	22/07/2015	5502,9	21/08/2015	4234,1
23/06/2015	426,5	23/07/2015	1523,0	22/08/2015	5887,0
24/06/2015	1674,9	24/07/2015	679,0	23/08/2015	1260,8
25/06/2015	4655,5	25/07/2015	2052,9	24/08/2015	3171,9
26/06/2015	6409,4	26/07/2015	1963,5	25/08/2015	1008,0
27/06/2015	6183,3	27/07/2015	4364,5	26/08/2015	4539,1
28/06/2015	5850,9	28/07/2015	6455,3	27/08/2015	4040,3
29/06/2015	5429,6	29/07/2015	6289,4	28/08/2015	6408,8

29/08/2015	6747,7	28/09/2015	5202,3	28/10/2015	4897,7
30/08/2015	6469,2	29/09/2015	6981,5	29/10/2015	6630,2
31/08/2015	6575,7	30/09/2015	2783,8	30/10/2015	5633,2
01/09/2015	759,8	01/10/2015	2948,6	31/10/2015	2295,6
02/09/2015	1378,9	02/10/2015	4457,4	01/11/2015	882,9
03/09/2015	4224,7	03/10/2015	840,7	02/11/2015	915,8
04/09/2015	1345,3	04/10/2015	2383,3	03/11/2015	1565,9
05/09/2015	3046,9	05/10/2015	7057,9	04/11/2015	881,3
06/09/2015	1611,6	06/10/2015	2035,0	05/11/2015	1222,7
07/09/2015	5445,4	07/10/2015	3789,9	06/11/2015	1281,8
08/09/2015	2010,0	08/10/2015	589,7	07/11/2015	1908,8
09/09/2015	7309,4	09/10/2015	1332,9	08/11/2015	3216,2
10/09/2015	3953,8	10/10/2015	1502,1	09/11/2015	5179,7
11/09/2015	1035,6	11/10/2015	1718,3	10/11/2015	3703,8
12/09/2015	7376,8	12/10/2015	2246,6	11/11/2015	3094,2
13/09/2015	6907,8	13/10/2015	1404,7	12/11/2015	3025,5
14/09/2015	6991,5	14/10/2015	4514,3	13/11/2015	1547,0
15/09/2015	6787,6	15/10/2015	2322,7	14/11/2015	4280,2
16/09/2015	2136,2	16/10/2015	530,4	15/11/2015	6814,9
17/09/2015	663,6	17/10/2015	1832,6	16/11/2015	3305,3
18/09/2015	565,9	18/10/2015	5908,7	17/11/2015	3250,8
19/09/2015	838,0	19/10/2015	6262,1	18/11/2015	5671,6
20/09/2015	477,9	20/10/2015	4556,6	19/11/2015	6135,6
21/09/2015	3728,9	21/10/2015	348,7	20/11/2015	5474,1
22/09/2015	2245,4	22/10/2015	594,9	21/11/2015	6783,4
23/09/2015	5747,2	23/10/2015	1809,8	22/11/2015	4347,1
24/09/2015	4582,5	24/10/2015	4307,6	23/11/2015	975,5
25/09/2015	728,4	25/10/2015	1754,6	24/11/2015	1932,2
26/09/2015	588,2	26/10/2015	3510,7	25/11/2015	2115,9
27/09/2015	1504,7	27/10/2015	1315,5	26/11/2015	2559,1

27/11/2015	2758,0	27/12/2015	2646,6	26/01/2016	2706,0
28/11/2015	2026,8	28/12/2015	2989,9	27/01/2016	1751,3
29/11/2015	4377,8	29/12/2015	2542,3	28/01/2016	1847,6
30/11/2015	4104,2	30/12/2015	3740,9	29/01/2016	5902,2
01/12/2015	4484,2	31/12/2015	4714,3	30/01/2016	5491,4
02/12/2015	705,3	01/01/2016	1409,0	31/01/2016	786,2
03/12/2015	3749,9	02/01/2016	1702,1	01/02/2016	990,4
04/12/2015	3043,0	03/01/2016	2282,5	02/02/2016	1742,8
05/12/2015	4437,6	04/01/2016	3725,2	03/02/2016	1697,7
06/12/2015	1497,6	05/01/2016	5973,9	04/02/2016	3489,3
07/12/2015	2805,6	06/01/2016	4541,9	05/02/2016	1886,2
08/12/2015	6387,4	07/01/2016	2036,7	06/02/2016	2741,5
09/12/2015	4494,1	08/01/2016	1597,9	07/02/2016	1683,7
10/12/2015	1216,3	09/01/2016	2888,2	08/02/2016	6456,4
11/12/2015	5471,2	10/01/2016	1276,2	09/02/2016	2540,5
12/12/2015	4344,2	11/01/2016	3949,2	10/02/2016	2751,5
13/12/2015	5602,0	12/01/2016	3782,1	11/02/2016	5652,5
14/12/2015	2799,6	13/01/2016	4751,6	12/02/2016	5817,8
15/12/2015	4401,2	14/01/2016	1443,5	13/02/2016	4893,5
16/12/2015	2818,1	15/01/2016	3843,5	14/02/2016	2833,3
17/12/2015	5759,8	16/01/2016	6759,6	15/02/2016	2555,8
18/12/2015	4039,8	17/01/2016	6102,9	16/02/2016	1938,7
19/12/2015	1259,7	18/01/2016	6608,1	17/02/2016	497,3
20/12/2015	1222,1	19/01/2016	6439,5		
21/12/2015	2392,6	20/01/2016	6268,0		
22/12/2015	4960,7	21/01/2016	5138,1		
23/12/2015	3284,0	22/01/2016	5942,0		
24/12/2015	1547,4	23/01/2016	6450,3		
25/12/2015	1569,4	24/01/2016	6532,3		
26/12/2015	3322,7	25/01/2016	5343,5		