

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Dissertação de Mestrado

**Sistema para Dimensionamento de Geração de Energia
Fotovoltaica para Aquecimento de Tanques de Criação de
Camarões**

Letieri Rodrigues de Ávila

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Menezes de Oliveira
Coorientador: Prof. Dr. Nelson Lopes Duarte Filho

Rio Grande, 2017

Ficha catalográfica

S958s Ávila, Letieri Rodrigues de.
Sistema para dimensionamento de geração de energia fotovoltaica
para aquecimento de tanques de criação de camarões / Letieri Rodrigues
de Ávila. – 2017.
72 p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG,
Programa de Pós-graduação em Computação, Rio Grande/RS, 2017.
Orientador: Dr. Vinícius Menezes de Oliveira.
Coorientador: Dr. Nelson Lopes Duarte Filho.

1. Sistema fotovoltaico 2. Temperatura 3. Criação de camarão
4. Controle I. Oliveira, Vinícius Menezes de II. Duarte Filho, Nelson
Lopes III. Título.

CDU 620.91



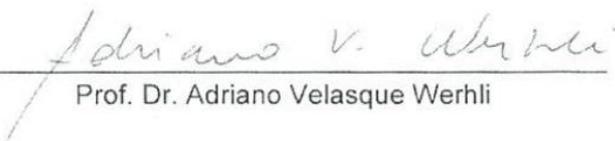
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Projeto de um sistema para dimensionamento de geração de energia
fotovoltaica para aquecimento de tanques de criação de camarões.

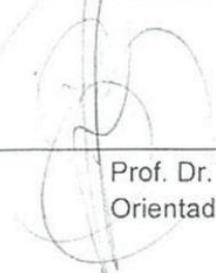
Letieri Rodrigues de Ávila

Banca examinadora:


Prof. Dr. Adriano Velasque Werhli


Prof. Dra. Lucíola Campestrini


Prof. Dr. Luis Poersch


Prof. Dr. Vinícius Menezes de Oliveira
Orientador

Dedico este trabalho à minha família!!!

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus. Durante essa trajetória de aprendizado continuado muitas pessoas estiveram e estão presentes: meus familiares, amigos da CEEE-D, da FURG, do IFRS, entre tantos. Sendo assim, tenho uma infinidade de agradecimentos. Preciso e vou destacar os mais presentes, porém peço desculpas aos não citados.

Começo pelos meus pais, pela infinidade de lições e pelo apoio incondicional em todas as situações cotidianas, amo e agradeço vocês a cada dia por ter nascido desse amor, este que me transmitem e é, no mínimo, contagiante. Agradeço também a minha sogra Maria de Fátima que está sempre ao lado de minha família, muito obrigado pelo apoio. Assim, prossigo com a linda família que formei com minha esposa, meu menino, minha menina e o meu mais velho: Icele, Anry, Lia e Gustavo. Não tenho limites para fazer qualquer coisa que possa proporcionar o melhor para vocês, amo cada um infinitamente. Obrigado por estarem presentes em mais uma realização. Da CEEE-D, agradeço aos amigos da SMRE, especialmente o Mário Jorge, que fez sempre o máximo para permitir meu acesso à FURG. Da FURG bons amigos que ficam e seguem me apoiando diariamente: Luciane, Igor, Braian, Átila, Xanxerê, Luísa, Jusoan, Everson, Dom, Torales, Paulo, Rilene, Deliel, Sibyla, Anna Carolina, Leonardo, entre outros. Do IFRS, meu atual local de trabalho, colegas e alunos que torcem por mim de verdade: Alexandre, Marcos, Milton, Rodnei, Liziane, Tonin, Sheron, entre outros. Para os resultados que apresento aqui, foram imprescindíveis os colegas Jagunço, Carlos, Diogo e meu amigo de longa data e mais do que parceiro de estudos, desde os tempos do curso técnico, o Thiago Fonseca. Muito obrigado pessoal, sem vocês não seria possível...

Agradeço especialmente ao meu orientador, o Prof. Dr. Vinícius Menezes de Oliveira, o qual abraçou minha causa e enxergou um projeto onde eu poderia desenvolver algo promissor. A virtude de um grande mestre está em enxergar um passo à frente. Imenso agradecimento cabe também ao pessoal da Estação Marinha de Aquicultura, na pessoa do Prof. Dr. Luis Henrique da Silva Poersch, que permitiu a coleta de dados e livre acesso à toda estrutura disponível.

Enfim agradeço por estar em constante crescimento e com saúde pra superar novos desafios, que venham os próximos!!!

*”Eu sou descendente Zulú
Sou um soldado de Ogum
devoto dessa imensa legião de Jorge
Eu sincretizado na fé
Sou carregado de axé
E protegido por um cavaleiro nobre”
Autores: Marcos e Claudemir*

RESUMO

ÁVILA, Letieri Rodrigues de. **Sistema para Dimensionamento de Geração de Energia Fotovoltaica para Aquecimento de Tanques de Criação de Camarões**. 2017. 72 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

A crescente demanda alimentar face ao crescimento populacional fomentou a criação de animais em ambientes controlados objetivando o suprimento nutricional da população. A criação de camarões em tanques é uma técnica utilizada comercialmente em alguns países do mundo. Assim, diversos pesquisadores tem se dedicado às melhores práticas para obtenção de animais qualitativamente superiores.

Como contribuição aliada a outras técnicas desenvolvidas especificamente na área da aquicultura, neste trabalho, o objetivo principal é dimensionar um sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica. Este sistema deve ser responsável pelo suprimento energético de um sistema de aquecimento da água dos tanques de camarões.

Então, almeja-se manter a temperatura da água dos tanques de criação de camarões em níveis adequados ao crescimento saudável dos animais. Além disso, com este dimensionamento, espera-se ampliar o número de ciclos de criação, principalmente em regiões mais frias. Justifica-se a aplicabilidade da proposta já que em muitos lugares no mundo as temperaturas médias são muito inferiores aos valores adequados para a criação de camarões em tanques, minimizando a possibilidade de ampliação da diversidade alimentar através da aquicultura. Soma-se a isso, a preocupação com a preservação do meio ambiente através da utilização do sol como fonte de energia principal do sistema dimensionado.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico, Temperatura, Criação de Camarão, Controle.

ABSTRACT

ÁVILA, Letieri Rodrigues de.

. 2017. 72 f. Qualificação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

The increase of food demand in face of population growth has encouraged the cultivation of crops in controlled environments aiming to supply the population's needs. The creation of shrimps in tanks is a technique used commercially in some countries of the world. Thus, several researchers have been dedicating themselves to improve cultivation methods in order to obtain qualitatively superior aquatic species. As a contribution to other techniques specifically developed for aquaculture purpose, in this work, the main objective is to design a photovoltaic electric energy generation system. This system should be responsible for the electricity supply of a water heating system for shrimp tanks. Therefore, it is desired to keep the water temperature of the shrimp farming tanks at levels appropriate to the healthy growth and development of the aquatic species. In addition, with this design, it is expected to increase the number of breeding cycles, especially in colder regions. The applicability of the proposal is justified since in many places around the world average temperatures are much lower than the ideal parameters for shrimp farming in tanks, reducing the possibility of increasing food diversity through aquaculture. In addition, the concern for the preservation of the environment through the use of solar energy as the main source of the dimensioned system.

Keywords: Control, Temperature , Shrimp farming, PV Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Aeração responsável pela manutenção do nível de oxigênio dissolvido em três sistemas diferentes.	17
Figura 2	Sistema termossolar utilizado para aquecimento de água conhecido como termossifão. A água é aquecida ao circular pela tubulação interna do coletor solar conservando-se na parte superior do reservatório onde geralmente fica localizada a saída de água e o sistema de apoio resistivo.	18
Figura 3	Potencial anual de geração fotovoltaica no Brasil relacionado ao número de habitantes. As regiões avermelhadas e esverdeadas representam, respectivamente, os maiores e menores índices de irradiação global por área e por consequência os maiores e menores potenciais para geração fotovoltaica.	20
Figura 4	Perspectiva do crescimento da produção de pescados até o ano de 2025 de acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação.	21
Figura 5	Matriz energética brasileira em 2017 representando as fontes renováveis hídrica e fotovoltaica expressas em percentuais.	26
Figura 6	Módulo fotovoltaico monocristalino composto por material semicondutor puro em detrimento aos policristalinos concebidos através da união de semicondutores com características de pureza diferentes.	28
Figura 7	Associação de módulos fotovoltaicos com manutenção da corrente elétrica na ligação em série e da tensão elétrica na ligação em paralelo.	28
Figura 8	Esquema de um SFVNC (isolado) com método de armazenamento utilizado em locais sem redes de distribuição das concessionárias ou em aplicação específicas.	29
Figura 9	Controlador de carga típico para SFVNC responsável por manter o carregamento dos sistemas de armazenamento e para ligações de cargas em corrente contínua.	30
Figura 10	Curva típica de ciclos x profundidade de descarga demonstrando a relação inversamente proporcional entre os ciclos de carga e a profundidade de descarga.	30
Figura 11	Bateria estacionária/selada do fabricante Freedom utilizada em SFVNC.	31
Figura 12	Inversor de tensão <i>off grid</i> Hayonik que fornece energia máxima de 3 kWh com tensão de saída senoidal pura, idêntica a distribuída pelas concessionárias.	31

Figura 13	Esquema de um SFVCR contemplando o sistema de medição bidirecional que permite o registro do consumo assim como da geração de energia elétrica.	32
Figura 14	Inversor de tensão <i>On Grid</i> Fronius Primo que fornece a energia máxima de <i>2kWp</i> com sistema de proteções regulamentadas pela ANEEL.	33
Figura 15	Sistema fotovoltaico híbrido com sistema eólico, gerador à diesel e um banco de baterias interligados por um barramento em corrente contínua e posterior inversor de tensão.	34
Figura 16	Arquitetura <i>on</i> e <i>off grid</i> com o propósito de manter o funcionamento de um semáforo.	35
Figura 17	Ilustração de um modelo simplificado do tanque considerando vazões de entrada e saída (iguais pois o volume é constante), aquecimento e agitação.	37
Figura 18	Diagrama de blocos da planta desenvolvido no <i>Simulink</i> com controlador PID em malha fechada com realimentação unitária e tempo de atraso.	40
Figura 19	Resposta à entrada degrau com controlador PID sintonizado pelo método CHR com ajuste fino do tempo integral.	41
Figura 20	Planta em malha fechada com controlador PID, temperatura inicial e de referência e tempo de atraso desconsiderando as perdas na temperatura da água.	44
Figura 21	Resposta da planta controlada e consequente manutenção da temperatura	45
Figura 22	Ação de controle PID sobre a planta refletindo o controle atuante.	45
Figura 23	Tanque instalado em estufa que foi utilizado nos experimentos.	48
Figura 24	<i>Interface</i> do <i>Field Logger</i> com condicionadores de sinal para vários sensores de temperatura.	49
Figura 25	Tela da <i>interface</i> do <i>Field Logger</i> para definição dos limites de acionamento da saída analógica responsável pelo acionamento dos resistores de aquecimento.	50
Figura 26	Sensores PT100 e termopar tipo K instalados aos pares no interior e fora do tanque.	50
Figura 27	Resistores de aquecimento instalados em paralelo imersos no tanque.	51
Figura 28	Leituras do Voltímetro e do Amperímetro.	52
Figura 29	Sistema de controle e acionamento elaborado para os experimentos contendo o <i>Field Logger</i> , os disjuntores de proteção, o contator e o relé de acionamento para os resistores.	52
Figura 30	Leituras da temperatura ambiente coletada entre os dias 9 e 18/07/2017.	53
Figura 31	Temperatura ambiente média com desvio padrão inferior e superior.	54
Figura 32	Modelo de aproximação gerado pela ferramenta <i>Curve Fitting Tool</i> do MATLAB para a temperatura ambiente média.	55
Figura 33	Leituras da temperatura da água entre 9 e 18/07/17.	56
Figura 34	Temperatura média da água com desvio padrão inferior e superior.	56
Figura 35	Modelo de aproximação gerado pela <i>Curve Fitting Tool</i> do MATLAB para a temperatura média da água.	57

Figura 36	Aproximação gráfica do tempo de atraso considerando os sistemas de aeração e aquecimento desligados.	59
Figura 37	Aproximação gráfica do tempo de atraso com sistema de aeração ligado e de aquecimento desligado (situação operacional real da EMA.	59
Figura 38	Planta final em malha fechada com controle PID, temperaturas inicial e de referência, tempo de atraso e perturbação (perdas).	61
Figura 39	Resposta da planta ao sistema completo com as perdas, temperaturas inicial e de referência.	61
Figura 40	Perturbação (perdas) impostas à temperatura da água do tanque pela variação da temperatura ambiente dentro da estufa.	61
Figura 41	Ação de controle PID sobre a planta.	62
Figura 42	Aquecedor resistivo do fabricante <i>Pentair</i> com potência de $6kW$	63
Figura 43	Projeto <i>default</i> com a tela inicial e os blocos de funções.	65
Figura 44	Tela da <i>interface</i> disponibilizada ao usuário final com dimensionamento exemplo realizado pela mesma.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Equações para especificação de parâmetros de controladores PID conforme método CHR.	39
Tabela 2	Médias do banco de dados das leituras mensais do piranômetro da Embrapa Pelotas/RS.	44
Tabela 3	Combinação proposta entre as variáveis para coleta de dados.	48
Tabela 4	Variáveis da equação de Gauss aproximados pela <i>Curve Fitting Tool</i> para a temperatura ambiente média.	55
Tabela 5	Variáveis da equação de Gauss aproximados pela <i>Curve Fitting Tool</i> para a temperatura média da água.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EMA	Estação Marinha de Aquacultura.
FURG	Universidade Federal de Rio Grande.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
SFVCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.
SFVNC	Sistema Fotovoltaico não Conectado.
MATLAB	<i>Matrix Laboratory.</i>
BFT	<i>Biofloc Technology System.</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional.
STC	<i>Standard Test Conditions.</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
PID	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo.
VCC	Tensão Elétrica Contínua.
VAC	Tensão Elétrica Alternada.
kW	quiloWatt.
kWp	quiloWatt pico.
kWh	quiloWatt hora.
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of United Nations.</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Revisão bibliográfica	15
1.2	Criação de camarões em tanques	20
2	GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	25
2.1	Geração de energia	26
2.2	Módulos fotovoltaicos	26
2.3	Sistemas fotovoltaicos não conectados à rede ou isolados	29
2.4	Sistemas fotovoltaicos conectados à rede	32
2.5	Sistemas de geração de energia elétrica híbridos	34
2.6	Compensação de energia	35
3	MODELAGEM E CONTROLE DO PROCESSO	36
3.1	Tanques de criação de camarões da EMA	36
3.2	Função de transferência do sistema	36
3.3	Controlador proporcional, integrativo e derivativo (PID)	39
4	METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	42
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	47
5.1	Protótipo experimental utilizado	48
5.2	Aquisição de dados das medições	53
5.3	Análise dos dados coletados	60
5.4	Dimensionamento do sistema fotovoltaico	62
5.5	Interface gráfica para dimensionamento	64
6	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 Revisão bibliográfica

O crescimento da demanda alimentar nas últimas décadas fomentou a elevação do consumo de pescados no mundo. Dentre as carnes, os pescados são os mais consumidos. Na China, o consumo médio *per capita*, entre os anos de 2013 e 2015, era de 39,5kg, já no Brasil, o consumo era de 9,6kg. As perspectivas de consumo para o ano de 2025 são de 47,6kg para a China e 12,7kg para o Brasil (FAO, 2016).

A produção mundial de pescados tem crescido a uma taxa média anual de 3,2% nos últimos 50 anos, superando o incremento populacional do mesmo período em 1,6% (Brabo et al., 2016). Claramente essa busca impulsionou a aquicultura como forma complementar aos métodos tradicionais de pesca, permitindo assim, avanços em pesquisas científicas na área.

Face ao contínuo aumento da população mundial, tem-se visto de forma cada vez mais importante a aquicultura em diversos países do mundo, destacando-se o fato de que a aquicultura já ultrapassou, em níveis produtivos, a pesca por captura. No entanto, para produzir pescados em tanques ou viveiros, de maneira segura e eficiente, torna-se cada vez mais necessário o controle dos principais parâmetros de interesse para o processo, como pH, oxigênio dissolvido e temperatura. Um destes parâmetros, que influencia diretamente na produção de pescados é a temperatura. Há limites máximo e mínimo, que variam de acordo com a espécie que se esteja criando, para que se maximize a produção por ciclo de cultivo. Destaca-se que, em regiões com as estações climáticas bem definidas, tem-se uma redução da temperatura no inverno, dificultando o desenvolvimento de ciclos de cultivo nesta época em regiões com tais níveis de temperatura. Nesse sentido, torna-se importante considerar o parâmetro temperatura a fim de se estabelecer soluções que permitam expandir a quantidade de ciclos de cultivo durante as épocas de baixa temperatura ambiente.

Assim, esta situação leva à proposição de um sistema de aquecimento e manutenção da temperatura da água dos tanques de cultivo. Em virtude do progresso requerido por esta crescente demanda, soma-se a utilização de energia renovável fotovoltaica como for-

necedora da energia elétrica necessária ao sistema proposto. Além da obtenção de maior massa alimentícia, um sistema de controle de temperatura mantido por energia fotovoltaica, proporciona a redução do uso de combustíveis fósseis, sustentabilidade, preservação do meio ambiente, entre outros.

Hoje em dia existem basicamente dois sistemas fechados para criação de camarões: os sistemas de recirculação e os sistemas com bioflocos. Os sistemas que utilizam *Biofloc Technology System* - BFT são caracterizados por altas densidades de estocagem, manejo adequado de ração, aeração intensiva e formação de flocos microbianos (Wasiolesky et al., 2006).

Nos sistemas tradicionais de produção, com recirculação, a renovação dos grandes volumes de água dos tanques implicava em um grande problema na criação de camarões, pois estes sistemas requerem grandes volumes de água, sendo necessários de $20m^3$ a $64m^3$ para produzir $1kg$ de camarão.

Já o sistema de criação que utiliza a tecnologia BFT, necessitam apenas de 1% desse volume (Krummenauer, 2012) com a grande vantagem da reutilização da água por diversos ciclos de produção.

A aeração, que é o sistema de manutenção do nível de oxigênio dissolvido na água, desempenha funções importantes que irão refletir no sucesso da produção. Além da demanda de oxigênio necessária para a sobrevivência dos camarões, a criação com baixa ou nenhuma renovação de água necessita de um aporte extra, que é consumido pelo fitoplâncton e na respiração dos bioflocos, que devem estar em constante ressuspensão na coluna d'água (Zemor, 2014). Os aeradores também são responsáveis pela mistura do volume de água do tanque combinando os níveis de oxigênio dissolvido entre as camadas superiores e inferiores. A Figura 1 demonstra três sistemas aeradores diferentes.

Ademais, os valores médios de pH entre 7,0 e 9,0 são considerados apropriados para o bom desempenho de crescimento dos camarões. Uma queda do pH nas semanas iniciais da criação é normal, devido a alta taxa de respiração dos organismos heterotróficos e altas densidades de estocagem (Costa, 2013).

Na região sul do Brasil, a produção de camarões geralmente fica restrita a uma, no máximo duas, safras por ano, desenvolvida nos meses com maior temperatura. Assim, a criação de camarões nessa região são comumente realizadas no início da primavera até o início do outono (Barbosa, 2013). Os valores médios de temperatura, que favorecem o máximo crescimento dos camarões, está entre 28 e $32^{\circ}C$ (Van Wyk and Scarpa, 1999). (Hostins, 2013) afirma que para a espécie *F. Brasiliensis* as temperaturas muito elevadas aumentam as taxas de crescimento durante o berçário, no entanto prejudicaram a qualidade da água contribuindo assim para a queda na sobrevivência em temperatura de $33^{\circ}C$. Logo, a temperatura da água assume importância relevante na criação de camarões em tanques.

Os sistemas de aquecimento para grandes volumes de água utilizam técnicas já difun-

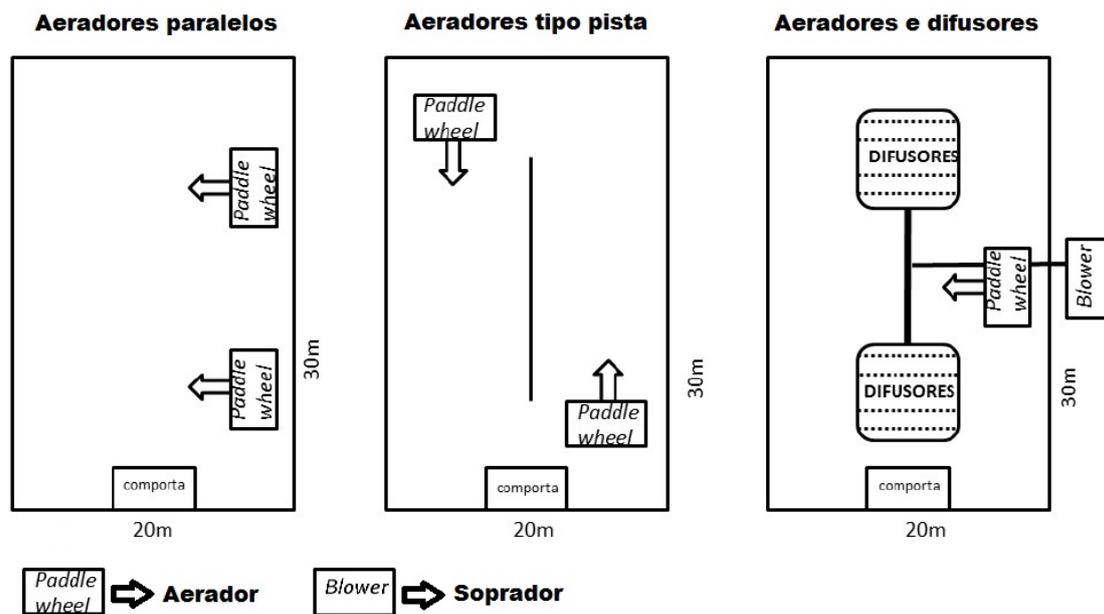


Figura 1: Aeração responsável pela manutenção do nível de oxigênio dissolvido em três sistemas diferentes.

Fonte: (Zemor, 2014).

didias comercialmente tais como: sistemas de aquecimento a gás, energia solar, queima de biomassa, entre outros. Destaca-se, desta forma, os sistemas de geração de energia elétrica a partir de caldeiras a vapor de água. Além de contribuir com a queima de biomassa residual, pode atender energeticamente outros processos de uma indústria, por exemplo. Em unidades agroindustriais a demanda por energia térmica é de até 85% na forma de vapor para processos como cozimento, digestão e secagem de matérias primas e de água quente para esterilização e limpeza (Gondim, 2017). No entanto, os sistemas de aquecimento de água a partir da energia solar ganham espaço, principalmente no Brasil, a grandes passos. Um dos sistemas mais utilizados, baseados em energia solar, é o sistema termossifão, como pode ser visto na Figura 2. O fenômeno de termossifão ocorre devido a diferença de massa específica da água que passa no coletor, ou seja, entre a temperatura que passa nos coletores e a temperatura que está armazenada no reservatório (Santos, 2010). No entanto, esses coletores, também chamados de termossolares, possuem grande dependência do clima, ou seja, em dias com pouca absorção de irradiação solar, a eficiência dos mesmos fica prejudicada (Santos, 2010).

Embora os sistemas termossolares sejam mais eficientes com relação aos fotovoltaicos, isto é, convertem mais irradiação solar em energia térmica do que os fotovoltaicos em energia elétrica, o uso para finalidades específicas carece de análise detalhada. Contudo, as experiências com sistemas híbridos de aquecimento já são uma realidade. Serrano et al. (2017) estuda a integração de sistemas solares para aquecimento da água e para geração de energia residencial. O sistema termossolar reduz o consumo de energia com chuwei-

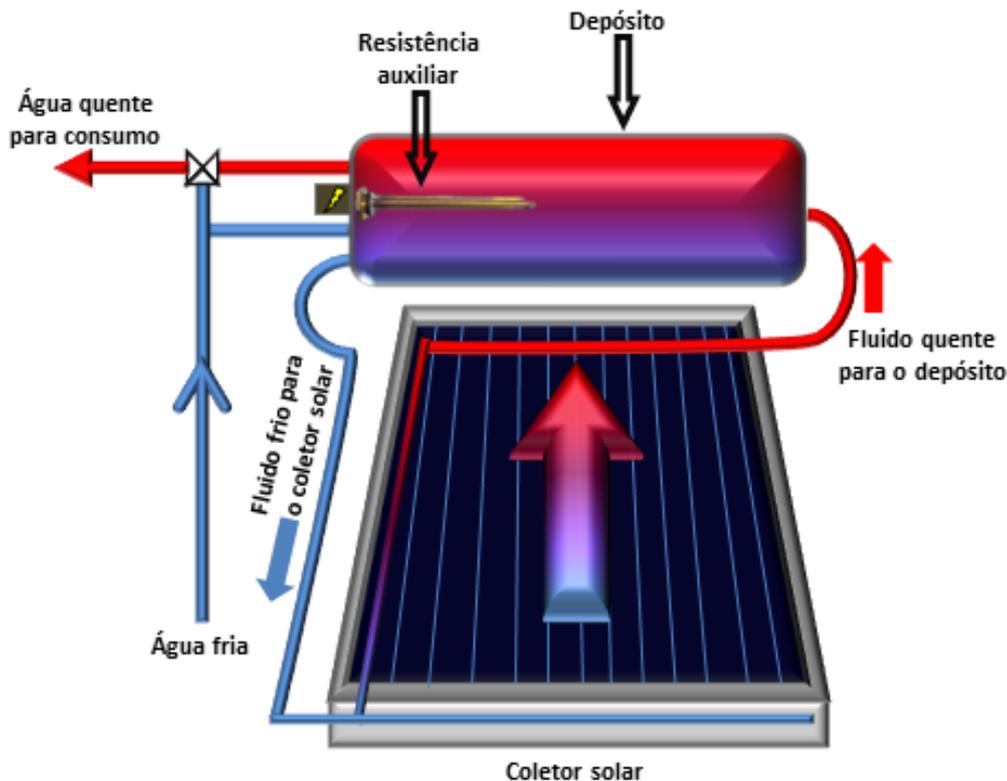


Figura 2: Sistema termossolar utilizado para aquecimento de água conhecido como termossifão. A água é aquecida ao circular pela tubulação interna do coletor solar conservando-se na parte superior do reservatório onde geralmente fica localizada a saída de água e o sistema de apoio resistivo.

Fonte: (Energéticos, 2017).

ros elétricos e o restante do consumo médio de energia elétrica da residência é atendido pelo sistema fotovoltaico. Num outro viés, os sistemas termossolares, em comparação aos sistemas fotovoltaicos, não possuem o benefício da geração e acumulação de créditos energéticos, isto é, não há um método de armazenamento ou reaproveitamento da energia gerada por ele. Assim, a combinação de ambos, atualmente, sugere uma melhor relação custo benefício ao consumidor.

Outro método de aquecimento mais simplificado consiste na imersão na água de resistores específicos para aquecimento. No entanto, este método não é bem visto principalmente pelo alto consumo de energia elétrica. Em sistemas residenciais, por exemplo, os resistores dos chuveiros elétricos possuem potências de quase 8000W. Isto significa que em uma casa com 4 pessoas, que utilizam o chuveiro elétrico diariamente durante 1 hora, o consumo mensal de energia pode chegar, somente com aquecimento de água, a 240 quiloWatt Hora - *kWh*. A quantidade de calor por unidade de tempo liberada pelo resistor é função da tensão de alimentação e do valor da resistência ôhmica do resistor. O controle de potência do equipamento se faz pela alteração do valor do resistor (Raimo, 2007). A quantidade de calor utilizada em um banho de 15 minutos, com aquecimento resistivo, pode chegar a 7,2MJ.

Outrossim, tratando-se de fontes de energias renováveis, a energia solar cresce exponencialmente no mundo. Atualmente, o maior produtor de energia solar fotovoltaica é a China, com mais de 150GW instalados. O Brasil encontra-se com uma potência instalada de aproximadamente 150MW. A radiação solar no Brasil atinge níveis elevados, ratificando essa informação, tem-se que o menor nível de irradiação solar no Brasil é 4 vezes superior aos níveis médios de irradiação da Alemanha, segundo país em potência fotovoltaica instalada no mundo. A taxa de energia emitida pelo sol é aproximadamente constante há bilhões de anos com uma potência da ordem de $3,86.10^{26} W$ (Bueno et al., 2017). A demanda crescente de energia elétrica, representada pelo uso crescente de aparelhos de ar condicionado, vem alterando o perfil de consumo e demanda no Brasil. Assim, ano a ano os valores máximos de demanda são registrados nos meses de verão e no horário entre 12 e 15 horas, com excelente coincidência com a disponibilidade de radiação solar para a geração fotovoltaica (Bueno et al., 2017).

O índice de radiação solar no Brasil é muito bom quando comparado a Europa, por exemplo. A maior irradiação solar global anual é verificada no norte do Estado da Bahia sendo da ordem de $6,3kWh/m^2$. Com isso, a média diária de irradiação ao longo de um ano, incidente em qualquer parte do território brasileiro varia de $4,3$ a $6,3kWh/m^2$ (Rosa and Gasparin, 2017). A Figura 3 demonstra o potencial anual de geração fotovoltaica no Brasil relacionado ao número de habitantes (Bueno et al., 2017).

Os sistemas fotovoltaicos são divididos basicamente em dois tipos: conectados à rede de distribuição ou isolados da mesma. Os sistemas isolados operam desconectados das redes de distribuição de concessionárias de energia elétrica. Estes sistemas podem ser construídos com a intenção de fornecer energia elétrica a equipamentos ou cargas em que não se deseja a dependência da rede elétrica convencional como por exemplo: sistemas de iluminação pública solar, sistemas de medição de dados, irrigação, entre outras diversas aplicações (Santiago, 2017). Entretanto, os sistemas fotovoltaicos conectados as redes de distribuição das concessionárias são capazes de inserir na rede elétrica convencional a sua energia gerada através da conexão elétrica entre o próprio sistema e a rede elétrica por meios dos inversores de tensão (Rampinelli, 2010). No Brasil, tais sistemas ganharam notoriedade a partir de 2012 com as resoluções emitidas pela ANEEL (Aneel, 2015).

Logo, considerando-se o custo operacional dos sistemas fotovoltaicos, na Itália por exemplo, o custo do kWh dos sistemas de geração de energia fotovoltaicos já é igual ao custo do kWh da rede de distribuição convencional. No Brasil, já comercializam-se sistemas fotovoltaicos com capacidade de geração acima de 1000 quiloWatt pico - kWp , a um preço médio de R\$ 2,50/ kWp . Recentes avanços pretendem aumentar a eficiência dos módulos fotovoltaicos, que hoje está entre 15 e 18% (Morgera and Lughì, 2015), o que deve impactar positivamente na redução dos custos de tais sistemas.

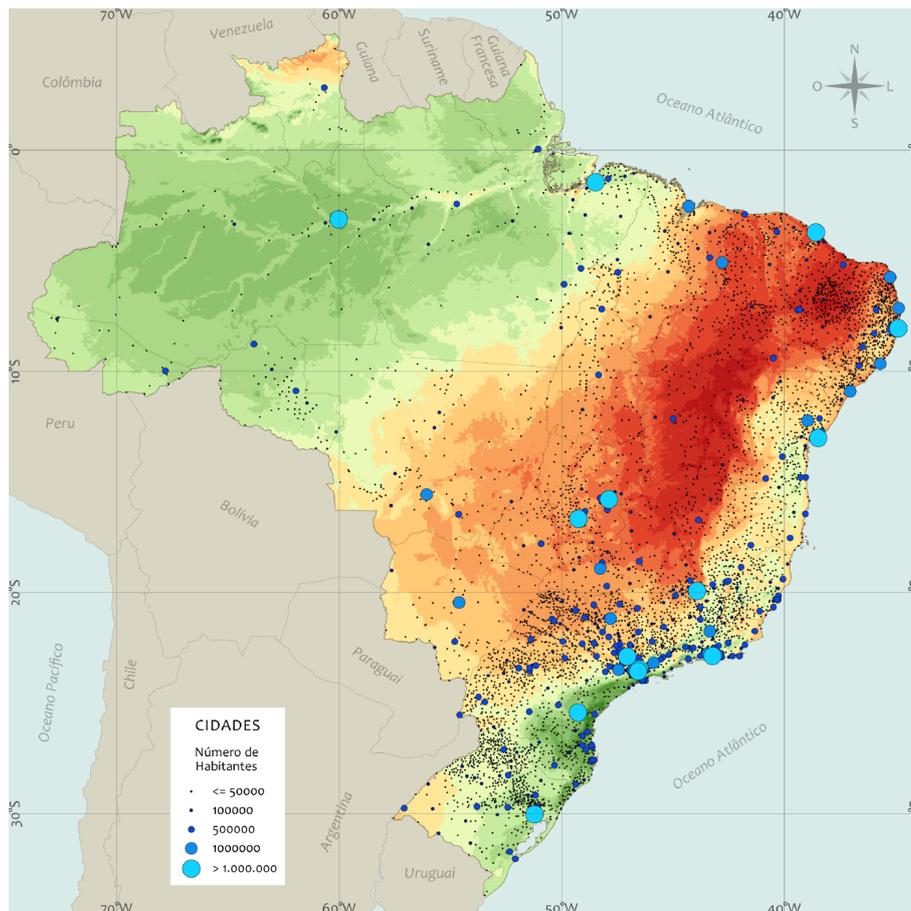


Figura 3: Potencial anual de geração fotovoltaica no Brasil relacionado ao número de habitantes. As regiões avermelhadas e esverdeadas representam, respectivamente, os maiores e menores índices de irradiação global por área e por consequência os maiores e menores potenciais para geração fotovoltaica.

Fonte: Adaptado de (Bueno et al., 2017)

1.2 Criação de camarões em tanques

A aquicultura é a criação de animais aquáticos em tanques ou viveiros. Somada a pesca tradicional foi responsável, em 2010, pela produção de 148 milhões de toneladas de animais destinados ao consumo humano (Zemor, 2014). Segundo o relatório da *Food and Agriculture Organization of United Nations* (FAO, 2016), até 2025 a produção deve superar 175 milhões de toneladas. A Figura 4 demonstra a perspectiva da aquicultura com relação à pesca por captura.

A carcinicultura, área da aquicultura responsável pela criação de camarões em tanques, possui elevada produção em países asiáticos (Costa, 2013). No Brasil, a região nordeste concentra a maior produção de camarões com mais de 95% do total do país (Poersch et al., 2006). A produção nordestina é destacada, pois a região concentra as temperaturas mais elevadas do país durante o ano inteiro. Os processos de criação de camarões são semelhantes no mundo diferindo em alguns aspectos como o manejo, a ração, a aeração, entre outros.

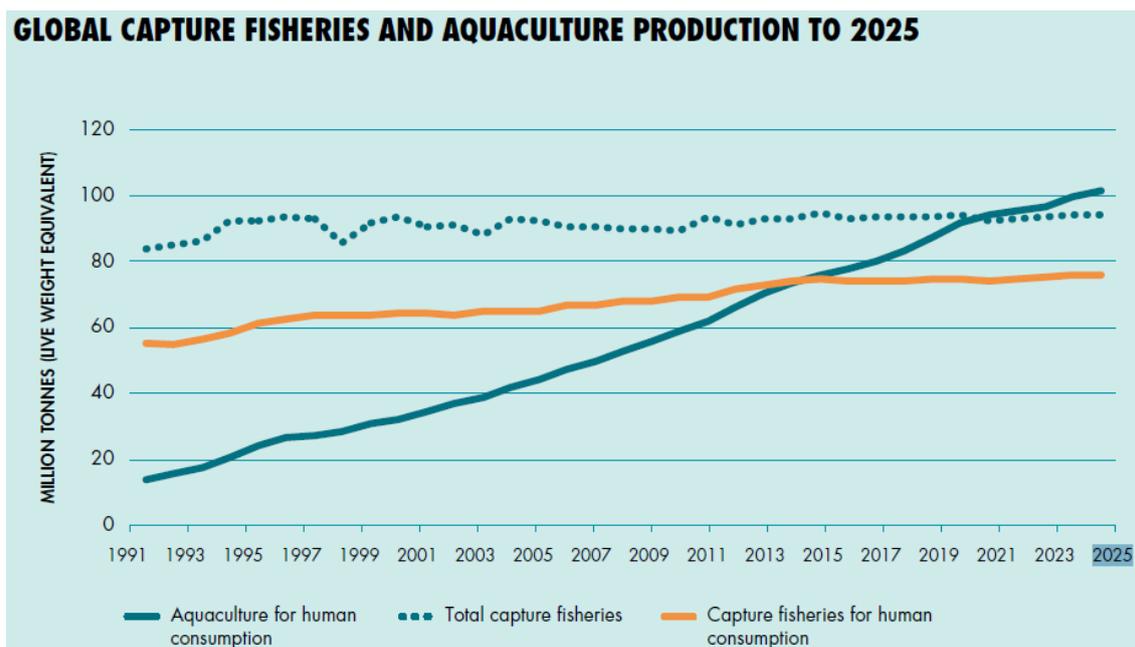


Figura 4: Perspectiva do crescimento da produção de pescados até o ano de 2025 de acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação.

Fonte: (FAO, 2016).

No entanto, os efluentes do processo intensivo de crescimento dos camarões são prejudiciais ao meio ambiente. A carcinicultura tradicional baseia-se principalmente na troca de água dos tanques durante a fase de engorda do camarão, para manter os parâmetros de qualidade da água (Burford et al., 2003). Na criação intensiva, o processo é trabalhado com pouca ou sem renovação da água através de BFT (Vinatea et al., 2010). Os bio-flocos são formados pela adição de Carbono nos tanques proporcionando a alteração da relação Carbono:Nitrogênio (C:N) através do acúmulo de nitrogenados (amônia, nitrito e nitrato) proporcionando assim o crescimento de bactérias heterotróficas (Costa, 2013). Estes bioflocos agregados à ração específica podem servir como alimento a alguns peixes e camarões como a Tainha e o *Litopenaus Vannamei*, respectivamente.

As pesquisas com esse tipo de alimentação receberam notoriedade em meados dos anos 90 (Krummenauer, 2012). Na Universidade Federal de Rio Grande - FURG, mais especificamente na Estação Marinha de Aquicultura - EMA, os tanques de criação de camarões recebem uma quantidade de bioflocos que devem ser rigorosamente controlados, pois ao crescerem, restringem o espaço para o crescimento dos próprios camarões. Uma alternativa ao crescimento é o sistema de policultivo com a criação de Tainhas que consomem também os bioflocos gerando um controle natural para o crescimento dos mesmos.

O ciclo da criação de camarões é dividido nas fases de berçário e engorda (Mishra et al., 2008). Nos sistemas de criação intensiva, as pós larvas são transferidas para tanques intermediários, onde permanecerão por algum período até serem estocados nas estruturas de engorda (Foes et al., 2011). As estruturas de berçário tem importante papel na

uniformização dos animais antes do processo de engorda (Moss and Moss, 2004) (Cohen et al., 2005).

Para os resultados experimentais parciais, relacionados às medições de temperatura ambiente da estufa e da água do tanque e coleta de dados, a EMA disponibilizou a estrutura capaz de fornecer os subsídios necessários ao desenvolvimento do trabalho. Assim, a fase de experimentos permitirá a modelagem do comportamento das variáveis medidas, que influenciam na dinâmica do sistema de aquecimento e, conseqüentemente, no dimensionamento do sistema fotovoltaico. Espera-se que, após as etapas iniciais mencionadas, tenha-se apoio financeiro para a implementação real do sistema dimensionado por este trabalho. A EMA também é responsável por diversas pesquisas com animais aquáticos, que vão desde a reprodução, engorda e captura avaliando as características físico-químicas durante todo o processo. A mesma se localiza às margens do Oceano Atlântico na praia do Cassino, cidade de Rio Grande/RS. Sua estrutura conta com servidores técnicos administrativos, professores, alunos de graduação e pós graduação além da cooperação de pescadores e proprietários de sistemas de criação de animais aquáticos em tanques e viveiros. É também uma referência em pesquisas no mundo, com sistemas BFT na criação de camarões e peixes. Através do trabalho proposto, espera-se contribuir com o prosseguimento das pesquisas relacionadas à criação de camarões, dada a relevância da temperatura dos tanques de engorda com relação ao aumento dos ciclos de produção.

A carcinicultura busca produzir camarões de elevada biomassa controlando algumas variáveis intrínsecas aos criadouros naturais. Para garantir o crescimento uniforme e adequado dos animais, variáveis físico-químicas como o pH, o oxigênio dissolvido e a temperatura da água devem ser monitoradas. Sem o devido controle, seja manual ou automático, os animais geralmente sofrem danos no seu desenvolvimento (peso e tamanho), podendo morrer em muitos casos. Sistemas de automação já estão sendo desenvolvidos e implementados para coletar e controlar variáveis importantes do processo.

Nos tanques tradicionais, o pH - Potencial Hidrogeniônico, que indica acidez ou alcalinidade da água é controlado por métodos manuais de medição e registro. Segundo (Costa, 2013) o nível adequado do pH para o desenvolvimento dos camarões está entre 7,0 e 9,0. Na rotina da EMA, as leituras e registros dessa variável são realizadas a cada 6 horas.

O nível de oxigênio dissolvido na água é outro fator extremamente importante nos tanques de criação de camarões, já que períodos com baixa concentração de oxigênio são mortais aos animais. Os excrementos e os restos de ração degradados formam nitrogênio e fósforo dissolvido. Apesar de gerarem massa microbiana que limpa a água servindo como alimento, a presença de oxigênio é indispensável ao processo. A manutenção dos níveis adequados de oxigênio pode ser realizada por um processo conhecido por aeração. Dentre os sistemas de aeração mais utilizados estão os difusores de ar, que são compostos por tubulações imersas no fundo dos tanques conectadas a sopradores de ar. A injeção

de oxigênio é dada pela formação de bolhas quando o ar comprimido é expelido pelas tubulações previamente furadas. Já os aeradores de pás, popularmente conhecidos por aquapás, tipo *paddle wheel* são os mais utilizados em sistemas intensivos de cultivo tradicional (Delgado et al., 2003). Além da importância respiratória dos animais e dos bioflocos em sistemas BFT, a constante mistura da água contribui para a homogeneização dos parâmetros físico-químicos e para a ressuspensão de partículas que tendem a acumular no fundo dos tanques.

Atualmente, os ciclos naturais de criação de camarões em tanques são realizados em períodos quentes durante o ano. Isso se deve a possibilidade de realizar a fase de engorda sob a temperatura ambiente ideal ao crescimento dos animais, já que a mesma é a fonte de aquecimento da água. Segundo Hostins (2013) a região nordeste do Brasil apresenta condições mais adequadas para a criação, por estar situada em zona tropical, com a prevalência de altas temperaturas. Entretanto, em regiões mais frias, os sistemas de criação de camarões não possuem a mesma eficiência operando em ciclos ou períodos menores. A faixa de temperatura considerada ideal e que proporciona o maior crescimento dos camarões, está entre 28 e 32°C (Van Wyk and Scarpa, 1999). Portanto, os tanques devem manter uma temperatura ideal para cada espécie de camarão cultivado. Niu et al. (2003) afirma que o conhecimento da temperatura ideal na qual um animal terá o melhor desempenho é de suma importância pois permitirá um manejo mais adequado nos sistemas de criação. De acordo com o estudo apresentado em Wasielesky (2000), para a espécie *F. paulensis*, por exemplo, o índice de sobrevivência é maior em temperaturas entre 26 e 28°C. No entanto, no processo de criação de camarões em tanques, temperaturas menores que as citadas por Van Wyk and Scarpa (1999) e Wasielesky (2000) não necessariamente inviabilizam o trabalho. Dependendo do local e da época de criação, um camarão com menor índice de crescimento sugere, ainda sim, um bom resultado.

Então, considerando a relevância dessa variável ao processo e buscando dimensionar um sistema que promova a manutenção e o controle da temperatura da água dos tanques, o referido trabalho propõe a ampliação dos ciclos de criação de camarões utilizando energia renovável fotovoltaica para a execução desta tarefa. Assim, utilizando uma fonte inesgotável de energia, aliada a resistores de aquecimento imersos, o sistema proposto deverá manter a temperatura da água conforme os requisitos de projeto.

Portanto, o grande benefício da proposta é a utilização de energia renovável fotovoltaica para a conversão em energia térmica amparado pelas Resoluções 482/2012 e 687/2015 emitidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, que permitem e geração de energia elétrica com acumulação de créditos em *kWh* pelo consumidor. Devido à manutenção da temperatura da água no período quente do ano coincidir com o período de máxima irradiação solar na região dos experimentos, a geração de energia elétrica fotovoltaica desse período não é aproveitada. Logo, durante aproximadamente 8 meses, o sistema fotovoltaico estará transformando a irradiação solar em energia elétrica idêntica

à distribuída pelas concessionárias gerando créditos para os meses de baixa incidência de irradiação solar. Por isso, o dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede - SFVCR para a manutenção da temperatura da água em tanques de criação de camarões demonstra vantagens com relação aos sistemas termossolares. Assim, os créditos em energia elétrica acumulados serão utilizados para aquecer a água dos tanques através de resistores imersos nos tanques durante os períodos frios. Não há impedimentos para que o sistema fotovoltaico dimensionado possa suprir a demanda energética de outras unidades da EMA. Adaptações para atendimento de localidades que não possuem energia elétrica distribuída, através de sistemas isolados ou Sistemas Fotovoltaicos Não Conectados - SFVNC podem ser viáveis. Estudos de viabilidade econômica devem compor a análise para a implementação do sistema proposto tendo como contraponto principal a relação entre o aumento produtivo dado pela elevação dos ciclos de criação e os custos de implementação, entre outros fatores.

O trabalho está organizado como segue: no Capítulo 1 foram apresentados os aspectos introdutórios ao trabalho tais como a revisão bibliográfica. No Capítulo 2 são conceituadas as características dos sistemas fotovoltaicos. A modelagem matemática e o sistema de controle baseados nos dados reais são demonstrados no Capítulo 3. Já no Capítulo 4 é demonstrada a metodologia para o dimensionamento do sistema fotovoltaico. Em seguida, no Capítulo 5 são abordados os resultados experimentais relacionados às medições de temperaturas, o dimensionamento do sistema fotovoltaico e a *interface* gráfica para o dimensionamento. Por fim, no Capítulo 6 são explicitadas as considerações finais e as sugestões para futuros trabalhos, seguidos das referências bibliográficas.

2 GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

No século XX, com a crise de energia na década de 70, o mundo percebeu a excessiva dependência dos combustíveis fósseis despertando a busca por fontes alternativas de energia (Varella, 2009). A geração de energia elétrica a partir de métodos renováveis ganha diariamente posição de destaque nas matrizes energéticas pelo mundo. No Brasil, especialmente as energias eólica e solar fotovoltaica cresceram consideravelmente nos últimos anos. Do nascimento das redes inteligentes às possíveis aplicações dos mais diversos tipos de geração, vários trabalhos foram concebidos e amplamente difundidos.

Nesse contexto, por definição, a palavra geração significa criação, invenção, concepção, ato de gerar, entre outros. No entanto, afirmar que gera-se energia pode ser uma afirmação falsa. Uma das definições mais modernas e versáteis relatam o conceito relativo à energia limpa, esta que sob alguns pontos de vista é confundida com energia renovável. No entanto, é necessário considerar que o processo de geração de energia é realmente um processo de transformação de uma energia em outra. A energia produzida pelas hidrelétricas, por exemplo, transforma a energia potencial e a energia cinética pelo acúmulo e movimento da água, respectivamente, em energia elétrica, através de turbinas. Além disso, a energia eólica transforma a energia do vento em energia elétrica. A fotovoltaica não é diferente e transforma também a energia solar em elétrica. Logo, a nomenclatura limpa não será usada neste trabalho pelo entendimento exposto. Segundo a lei da conservação de energia, a energia total do universo é constante. Esta que pode ser convertida de uma forma para outra, ou transferida de uma região para outra, mas a energia nunca pode ser criada, nem destruída (Afonso, 2012).

Atualmente, a matriz energética brasileira é composta em sua maioria por geração hídrica. Isto ilustra que grande parte da produção de energia provém de uma fonte renovável, mas também evidencia a dependência dos sistemas de chuvas e rios (Aneel, 2017). A Figura 5 demonstra a matriz energética brasileira em 2017.

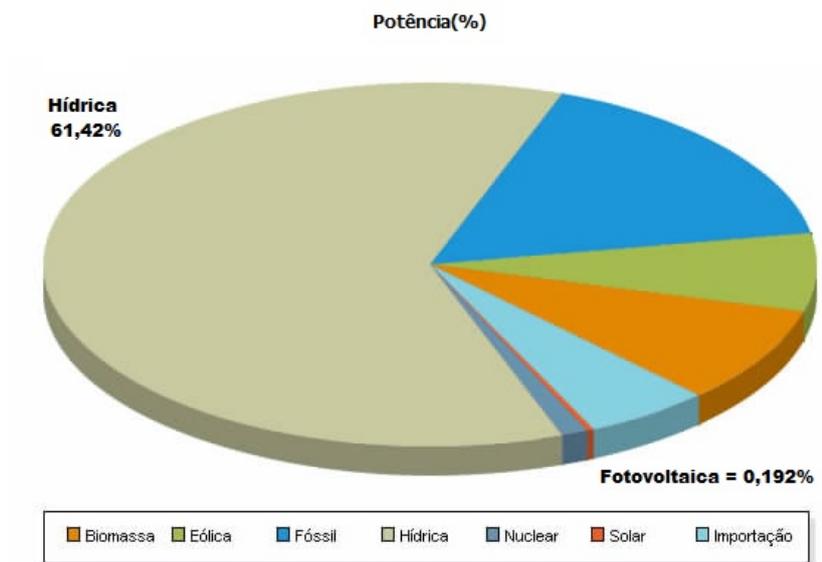


Figura 5: Matriz energética brasileira em 2017 representando as fontes renováveis hídrica e fotovoltaica expressas em percentuais.

Fonte: (Oliveira, 2017)

2.1 Geração de energia

A energia solar é considerada uma alternativa muito promissora para enfrentar os desafios da expansão da oferta de energia com menor impacto ambiental (Silva, 2017). Os sistemas fotovoltaicos nasceram como uma alternativa de geração de eletricidade para pequenas aplicações em lugares geralmente isolados ou que não tinham possibilidade de fornecimento convencional de eletricidade (Zumarán, 2000).

A energia fotovoltaica é concebida pela transformação da irradiação solar em uma tensão contínua. Através do efeito fotovoltaico, as células fotovoltaicas, geralmente construídas em silício, produzem uma diferença de potencial elétrico com o movimento dos elétrons no interior da mesma.

Em operação, atualmente, há cerca de 144MW de potência instalada em sistemas fotovoltaicos (Oliveira, 2017) no Brasil, sendo que a localidade com a menor capacidade de geração fotovoltaica por unidade de área é situada no estado de Santa Catarina. A irradiação solar nessa região é aproximadamente $4,25kWh.m^2$, superior em 4 vezes à irradiação solar média da Alemanha, um dos líderes mundiais na geração de energia fotovoltaica (Bandeira, 2012).

2.2 Módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos, popularmente conhecidos por placas solares, são os equipamentos responsáveis por converter a radiação solar em energia elétrica. São formados

pelo agrupamento de células fotovoltaicas, comumente construídas em silício, associadas em série. As associações de células fotovoltaicas são denominadas arranjos fotovoltaicos. Um módulo fotovoltaico, então, é formado por arranjos fotovoltaicos associados em série. Através do efeito fotovoltaico, a célula semicondutora gera uma diferença de potencial com valor próximo à 0,6 Volts em tensão contínua - VCC. Logo, por exemplo, um módulo com 60 células gera aproximadamente 36VCC em circuito aberto, ou seja, sem nenhuma carga em sua saída. A qualidade do semicondutor empregado em sua construção é um fator determinante para a capacidade de geração. Assim, no caso do silício, a qualidade é determinada pela pureza do elemento utilizado na construção da célula fotovoltaica. No mercado, atualmente, as células diferem-se pelos aspectos construtivos: policristalinas e monocristalinas. As células construídas com silício monocristalino são mais eficientes, pois são fabricadas através de uma única pastilha, já as células com silício policristalino são construídas com recortes de várias pastilhas, resultando em uma eficiência menor. A eficiência dos módulos fotovoltaicos é determinada pela razão entre a irradiação solar recebida por ele e a potência elétrica gerada em sua saída. Os mesmos são testados em condições ideais *STC - Standard Test Conditions*, recebendo uma irradiação de $1000\text{W}/\text{m}^2$, conseguindo converter em torno de 15% apenas em potência elétrica. Por isso, atualmente, a eficiência dos módulos fotovoltaicos é um paradigma da geração fotovoltaica e tema de diversas pesquisas científicas na área. No mercado brasileiro existem módulos ofertados com diferentes valores de potências. Entretanto, o que determina a potência elétrica que um módulo fotovoltaico é capaz de gerar é a área física a qual o mesmo está exposto à irradiação solar, proporcional ao número de células e a qualidade do semicondutor empregado na construção da célula fotovoltaica.

Adota-se como referência para o dimensionamento do sistema fotovoltaico deste trabalho, o módulo fotovoltaico do fabricante *Yingli Solar*, com área física de $1,65\text{m}^2$, construído através de 60 células de silício monocristalino. A Figura 6 apresenta um módulo fotovoltaico monocristalino com eficiência elevada.

Além disso, a associação dos módulos fotovoltaicos podem ser realizadas em série, paralela ou mista. As associações mistas são mais raras pela aplicabilidade específica das variáveis tensão e corrente elétrica. As associações em série são mais utilizadas nos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede – SFVCR, enquanto que as associações em paralelo são mais utilizadas nos Sistemas Fotovoltaicos Não Conectados – SFVNC. A diferença entre as associações refere-se à tensão e corrente elétrica: nos SFVNC, a tensão final da associação é a mesma de um módulo, sendo que a corrente elétrica é somada para todas as unidades e nos SFVCR, a tensão final da associação é dada pela soma de todas as unidades, enquanto que a corrente elétrica é a mesma em todo circuito. Nas Figuras 7(a) e 7(b) são demonstradas as ligações típicas dos módulos fotovoltaicos.

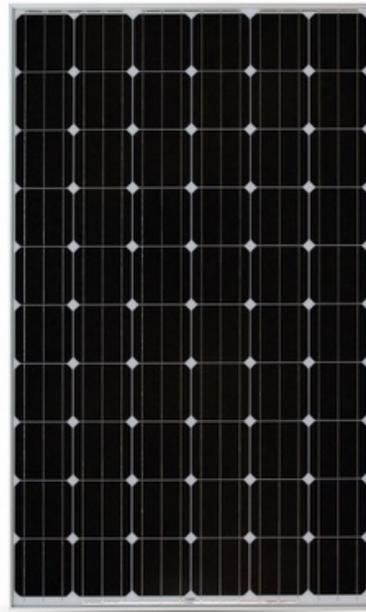
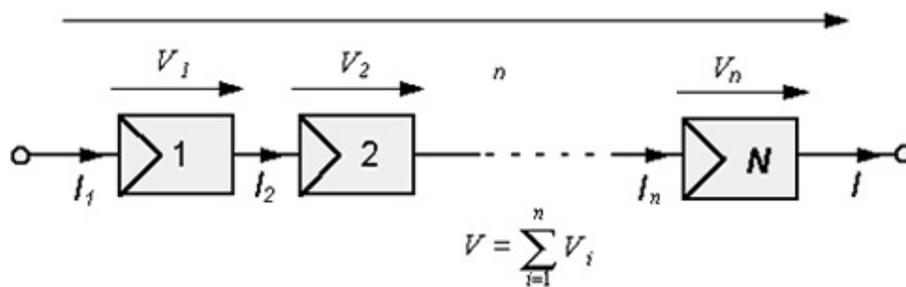
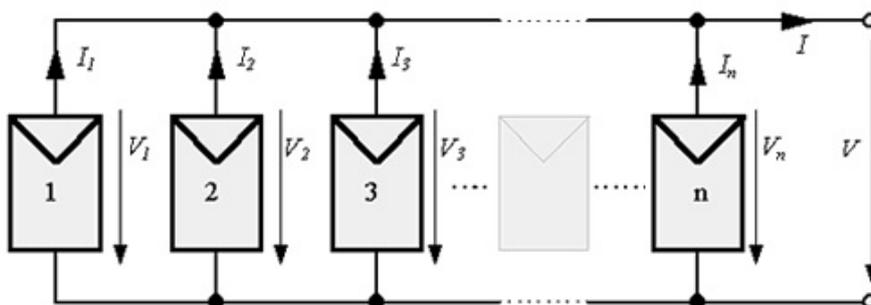


Figura 6: Módulo fotovoltaico monocristalino composto por material semiconductor puro em detrimento aos policristalinos concebidos através da união de semicondutores com características de pureza diferentes.

Fonte: Catálogo Yingli Solar



(a) Ligação em série.



(b) Ligação em paralelo.

Figura 7: Associação de módulos fotovoltaicos com manutenção da corrente elétrica na ligação em série e da tensão elétrica na ligação em paralelo.

2.3 Sistemas fotovoltaicos não conectados à rede ou isolados

Os Sistemas Fotovoltaicos Não Conectados – SFVNC ou isolados são aqueles que geram energia fotovoltaica em tensão contínua utilizando-a diretamente ou armazenando-a em bancos de baterias conhecidos por acumuladores. São geralmente aplicados em localidades que não possuem redes de distribuição de energia elétrica tradicionais ou em sistemas que requerem ininterruptibilidade no fornecimento elétrico, ou seja, sistemas de *backup*. Hoje no mercado, são conhecidos por sistemas *Off Grid*, justamente por não pertencerem a uma rede de distribuição. A Figura 8 mostra um esquema simplificado deste sistema.

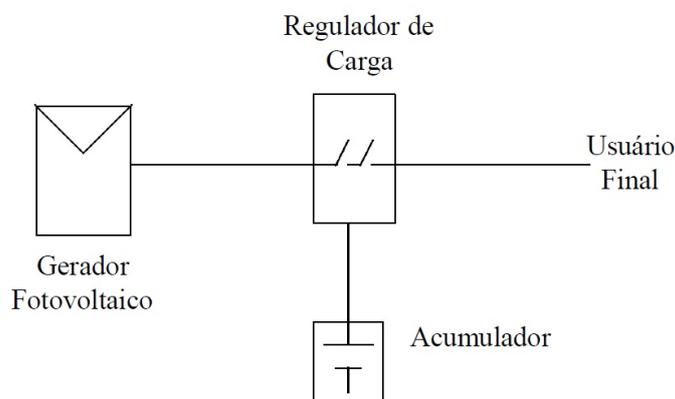


Figura 8: Esquema de um SFVNC (isolado) com método de armazenamento utilizado em locais sem redes de distribuição das concessionárias ou em aplicação específicas.

Fonte: (Zumarán, 2000).

Logo, os SFVNC podem ser utilizados em sistemas emergenciais de fornecimento de energia elétrica, tais como: hospitais, infraestrutura de tecnologia da informação, sistemas para redes de telefonia e comunicação, entre outros. No entanto, como pode ser visto na Figura 8, são necessários, além dos módulos fotovoltaicos, outros dispositivos para adequação dos níveis de tensão, carregamento dos bancos de baterias, acumuladores, sistemas de proteção, entre outros.

Ademais, os controladores de carga são os equipamentos responsáveis por adequar o nível de tensão proveniente dos módulos fotovoltaicos e gerenciar a corrente elétrica que será utilizada para carregamento do banco de baterias ou fornecer a utilização de equipamentos que operam em tensão contínua. Quando se encontra no processo de carregamento do banco de baterias, tradicionalmente faz o corte do mesmo quando a tensão monitorada está de acordo com o esperado, que em alguns casos, pode ser definido pelo usuário. Na Figura 9 é apresentado um controlador típico para esta aplicação.

As baterias ou acumuladores representam, em um SFVNC, o maior custo e a menor vida útil dentre os componentes. São de grande porte, entre 100Ah e 300Ah, e responsáveis por armazenar a energia gerada. Devem possuir a capacidade de descarga elevada, garantindo assim o qualidade no fornecimento da energia acumulada. As baterias



Figura 9: Controlador de carga típico para SFVNC responsável por manter o carregamento dos sistemas de armazenamento e para ligações de cargas em corrente contínua.

Fonte: (Energia, 2015).

ditas, de descarga profunda, suportam o consumo de até 80% da energia armazenada. Em contrapartida, as baterias automotivas fornecem em torno de 50% desta energia. Todavia, a relação entre os ciclos de carregamento de uma bateria de descarga profunda e a quantidade de energia absorvida da mesma é inversamente proporcional, conforme demonstra a Figura 10.

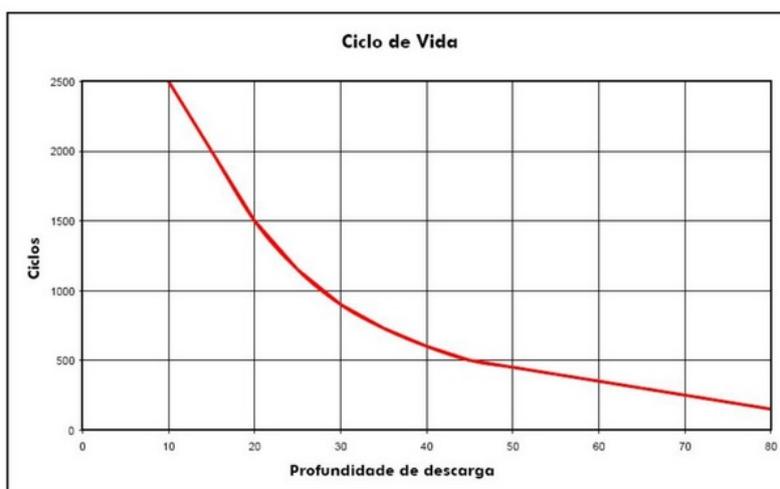


Figura 10: Curva típica de ciclos x profundidade de descarga demonstrando a relação inversamente proporcional entre os ciclos de carga e a profundidade de descarga.

Fonte: Catálogo Freedom - Power Safe

Dentre todos os componentes dos SFVNC, os acumuladores são os que, atualmente, vem passando por inovações tecnológicas severas, sendo que as pesquisas na área apontam, inclusive, o interesse das empresas geradoras de energia elétrica em adquirir a tecnologia de armazenamento. Assim com o uso de veículos elétricos de todos os portes, o incentivo tornou-se natural e fomentado pelos setores público e privado com relação às baterias e acumuladores em geral. Portanto, para dimensionar um banco de baterias ou sistema de acumulação, a relação estabelecida na Figura 10 deve ser considerada, assim como as perdas elétricas que ocorrem durante todo o processo de geração fotovoltaica até o fornecimento da energia acumulada. A Figura 11 mostra uma bateria do fabricante Fre-

edom do tipo estacionária/selada com garantia de 4 anos para uma descarga de até 80%.



Figura 11: Bateria estacionária/selada do fabricante Freedom utilizada em SFVNC.

Fonte: Catálogo Freedom - Power Safe

Na hipótese de que em um SFVNC a energia acumulada necessite ser transformada de tensão contínua para tensão alternada, será necessário o uso de um inversor de tensão. Os inversores mais comuns no mercado são os que fornecem tensão alternada em onda quadrada, onda quadrada modificada e onda senoidal pura. Desse modo, geralmente recebem tensões contínuas entre 12 e 48 VCC e convertem para tensões alternadas entre 110 e 230VAC. A energia máxima fornecida é variável, conforme o fabricante e o modelo. A Figura 12 demonstra um inversor de tensão do fabricante *Hayonik* para até 3000W com tensão de entrada 12VCC e tensão de saída 220VAC.



Figura 12: Inversor de tensão *off grid* Hayonik que fornece energia máxima de 3 kWh com tensão de saída senoidal pura, idêntica a distribuída pelas concessionárias.

Fonte: Catálogo de Inversores Hayonik

2.4 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede – SFVCR são aqueles que geram energia a partir dos módulos fotovoltaicos convertendo-a em tensão alternada com as mesmas características da tensão fornecida pela concessionária local, compartilhando-a com o sistema de distribuição da mesma. Tal procedimento é descrito nas Resoluções 482 de 2012 e 687 de 2015 emitidas pela ANEEL (Aneel, 2015). O SFVCR injetará energia na rede de distribuição da concessionária sempre que a energia gerada for maior que a energia absorvida pelas cargas da unidade consumidora. Quando o consumo da unidade consumidora for maior que a energia gerada pelo sistema, haverá, então, uma redução do somatório da energia injetada com a energia consumida. A tarefa de contabilizar estas energias é do medidor bidirecional que registra duas variáveis: a tradicional energia consumida e a energia injetada. Comercialmente são conhecidos como Sistemas *On Grid*, isto é, conectados à rede de distribuição da concessionária. A estrutura básica de um SFVCR é demonstrado na Figura 13.

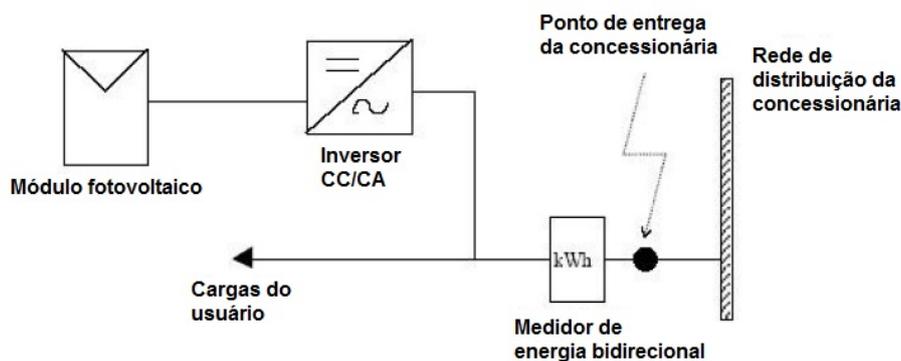


Figura 13: Esquema de um SFVCR contemplando o sistema de medição bidirecional que permite o registro do consumo assim como da geração de energia elétrica.

Fonte: Adaptação de (Zumarán, 2000).

Assim como nos SFVNC, nos SFVCR são necessários dispositivos de proteção e de transformação da energia gerada para a energia injetada nas redes de distribuição. Desse modo, o inversor de tensão é o componente mais importante destes sistemas possuindo a responsabilidade de adequar a tensão gerada em corrente contínua em tensão alternada com as mesmas características da distribuída pelas concessionárias. Em (Aneel, 2015), são divulgadas todas as normas pertinentes para a solicitação de acesso ao microgerador com potência instalada de até 75 quiloWatt - *kW*. Nestes documentos ainda são descritos todos os relés de proteção mínimos exigidos para que o microgerador possa conectar-se à rede de distribuição com segurança. Este relés podem ser comercializados separadamente, mas atualmente são intrínsecos aos inversores de tensão que, após rigorosos ensaios, são certificados pelos órgãos responsáveis. O relé de anti ilhamento é um dos mais importantes pois garante que o SFVCR isolar-se-á da rede de distribuição da concessionária

caso a mesma seja desligada, independentemente do motivo. Este procedimento de desconexão garante, inclusive, a segurança dos trabalhadores da própria concessionária em caso de desligamentos para manutenção, melhorias ou até mesmo falhas. Na Figura 14 é demonstrado o inversor Fronius Primo para a potência instalada máxima de $2kWp$, que pode atender o projeto proposto.



Figura 14: Inversor de tensão *On Grid* Fronius Primo que fornece a energia máxima de $2kWp$ com sistema de proteções regulamentadas pela ANEEL.

Fonte: Catálogo de Inversores Fronius

Nesse contexto, a unidade kWp determina a energia máxima convertida no pico de geração fotovoltaica e é diretamente proporcional ao número de módulos instalados. Para o caso do inversor da Figura 14, poderiam ser utilizados até 10 unidades de módulos fotovoltaicos de $200W$, ou seja, com capacidade total de gerar no máximo $2kWp$. Todos os inversores possuem limitações de tensões contínuas em sua entrada a qual, neste modelo, é de $1000VCC$. Portanto, para dimensionar os inversores de tensão para SFVCR bem como suas proteções, é necessário o conhecimento da tensão e corrente elétrica na entrada e saída do mesmo. Os condutores utilizados em SFVNC e SFVCR para corrente elétrica contínua possuem isolamento com proteção UV - Ultra Violeta em função de sua exposição contínua em telhados, marquises, etc. Quanto à capacidade de condução de corrente elétrica assemelham-se aos condutores de corrente alternada tradicionais normatizados pela norma brasileira NBR 5410/2004 da ABNT. Os dispositivos de proteção tanto para os SFVNC quanto para os SFVCR são semelhantes e devem ser dimensionados de acordo com o módulo e as características da corrente elétrica circulante nos mesmos. Cabe salientar que as Resoluções emitidas pela ANEEL preveem a utilização de dispositivos de proteção em tensão contínua e tensão alternada, além da proteção contra surtos de energia como, por exemplo, as descargas atmosféricas. Ademais, a EMA recebe ener-

gia elétrica da concessionária local em média tensão com adequação do nível de tensão através de um transformador próprio (13800VAC – 220VAC). Possui ainda um sistema de geração a diesel que responde automaticamente às faltas provenientes da concessionária local. Desta maneira, um SFVNC é injustificado devido à ausência de faltas de energia no local. Um SFVCR traria os benefícios da energia renovável gerando energia elétrica suficiente para manter a temperatura da água dos tanques de criação de camarão dentro da faixa aceitável. Além das questões ambientais abordadas anteriormente, produzir energia elétrica através de um SFVCR é vantajoso principalmente pela longevidade dos seus componentes que possuem garantia de geração fornecida pelos fabricantes de até 25 anos.

2.5 Sistemas de geração de energia elétrica híbridos

Os sistemas de geração de energia híbridos foram concebidos focados na ininterruptibilidade do fornecimento de energia elétrica. Originalmente, são formados por mais de uma fonte de energia combinadas, como exemplo, pode-se citar sistemas com geradores eólicos e fotovoltaicos gerando paralelamente. Na Figura 15, os sistemas híbridos com mais de uma fonte de geração de energia são apresentados no trabalho de (Arichi et al., 2012). Por outro lado, na Figura 16 a arquitetura SFH proposta por (Pires et al., 2014) é demonstrada. Essa aplicação foi utilizada para um semáforo que possui um módulo fotovoltaico operando como um SFVCR e em situações de contingência, como um SFVNC, semelhantemente aos sistemas *No-breaks* (UPS - *Uninterruptible Power Supply*).

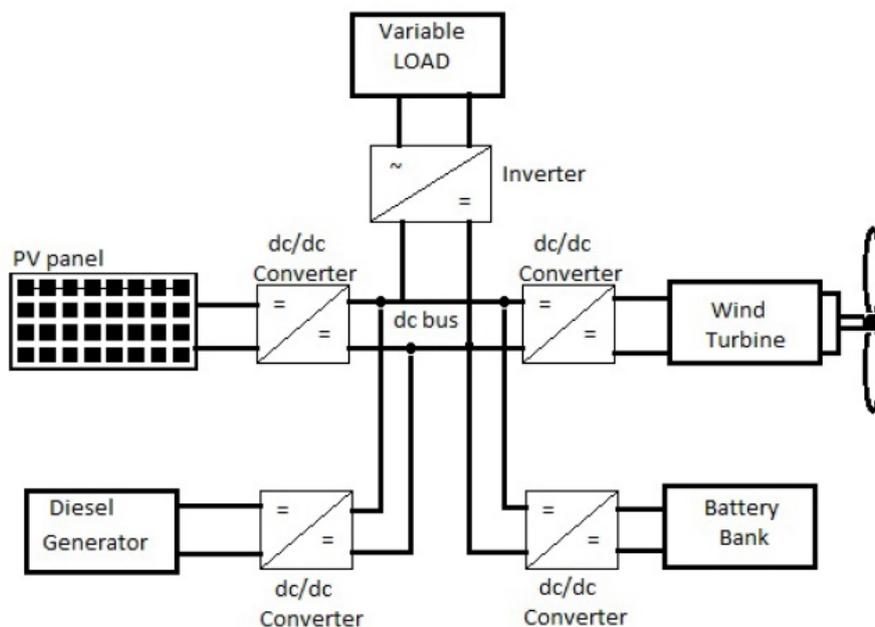


Figura 15: Sistema fotovoltaico híbrido com sistema eólico, gerador à diesel e um banco de baterias interligados por um barramento em corrente contínua e posterior inversor de tensão.

Fonte:(Arichi et al., 2012).

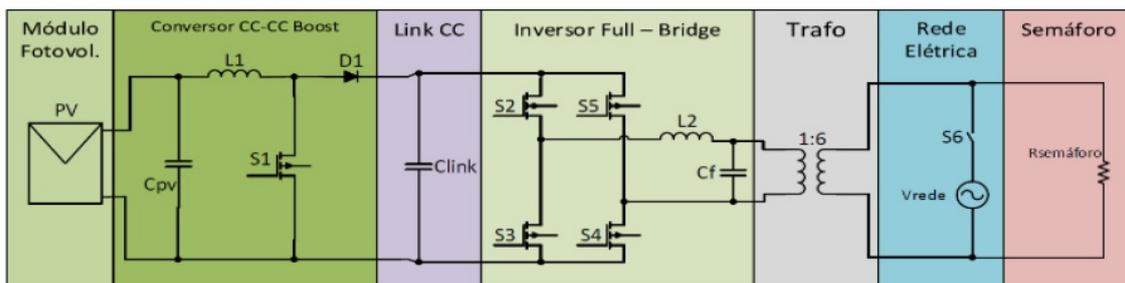


Figura 16: Arquitetura *on e off grid* com o propósito de manter o funcionamento de um semáforo.

Fonte: (Pires et al., 2014).

2.6 Compensação de energia

O SFVCR que deverá ser dimensionado nessa proposta estará apto a gerar energia elétrica durante o ano inteiro consoante ao nível de radiação solar do respectivo período. No Brasil, os maiores níveis de radiação solar global são registrados entre os meses de novembro e março, contíguos à estação de verão. Entretanto, o sistema de criação de camarões em tanques não possui restrições relacionadas à manutenção da temperatura da água durante o referido período. Portanto, a energia fotovoltaica gerada durante esse período deverá ser, em sua totalidade, injetada na rede de distribuição da concessionária, reduzindo instantaneamente o consumo e o faturamento da energia elétrica da EMA.

Na hipótese de que o SFVCR instalado tenha capacidade de geração de energia elétrica superior ao consumo da EMA, haverá a acumulação de créditos em energia (quilo Watt hora). Esta acumulação permite, inclusive, o uso de tais créditos em outras instalações comprovadamente cadastradas no mesmo CPF ou CNPJ (Aneel, 2015). Segundo a Resolução 482/2012, editada pela Resolução 687/2015, o prazo para utilização dos créditos por ventura gerados é de 60 meses (Aneel, 2015).

3 MODELAGEM E CONTROLE DO PROCESSO

3.1 Tanques de criação de camarões da EMA

Na EMA existem 6 conjuntos de tanques de camarões sob uma estufa, sendo cada conjunto composto por um tanque principal e dois auxiliares. Eventualmente, os tanques auxiliares recebem outros tipos de animais atendendo às pesquisas da EMA relacionadas ao policultivo de espécies. O policultivo baseia-se num sistema integrado de produção, no qual duas ou mais espécies aquáticas são criadas no mesmo local (Oliveira Costa, 2009). O sistema de policultivo implementado na EMA transporta a água dos tanques de camarão para outro tanque com tainhas que auxiliam no consumo dos bioflocos. Tal ação colabora com a redução da massa de bioflocos contidos no volume total da água. O volume máximo de água marinha no tanque principal é de 16000 litros, ao passo que nos auxiliares é de 3000 litros cada, com circulação entre os mesmos. Anteriormente às pesquisas com sistema BFT, havia a necessidade da remoção total deste volume de água dos tanques, como método de controle do nível de amônia oriundo dos excrementos e restos de ração dos camarões.

Portanto, considerando a temperatura como uma variável indispensável ao crescimento adequado dos camarões, pretende-se implementar um sistema de manutenção da temperatura dos tanques. Optou-se por instalar um resistor de aquecimento imerso na água que deverá dissipar a potência elétrica recebida da geração do sistema fotovoltaico dimensionado. Esta técnica de aquecimento é bem difundida na aquicultura evidenciada pelas diversas opções comerciais de resistores de aquecimento encontrados no mercado.

3.2 Função de transferência do sistema

As soluções para diversos problemas industriais, por exemplo, partem geralmente de projetos elaborados com fundamentação em resultados de simulações computacionais. Estas simulações são criadas com o propósito de fornecer subsídios técnicos que sintetizem os comportamentos reais dos componentes da planta analisada.

Para iniciar uma simulação computacional é imprescindível o desenvolvimento de um modelo matemático. Neste modelo, todas as variáveis da planta analisada devem estar

presentes. O modelo matemático utilizado para esse trabalho é baseado nas equações do balanço de energia e da entalpia. Bojorge (2013) propondo o controle de temperatura do modelo da Figura 17, utiliza o mesmo protótipo clássico onde o volume não varia em função do tempo. Na referida Figura, o agitador demonstrado é análogo ao sistema de aeração dos tanques de criação de camarões da EMA.

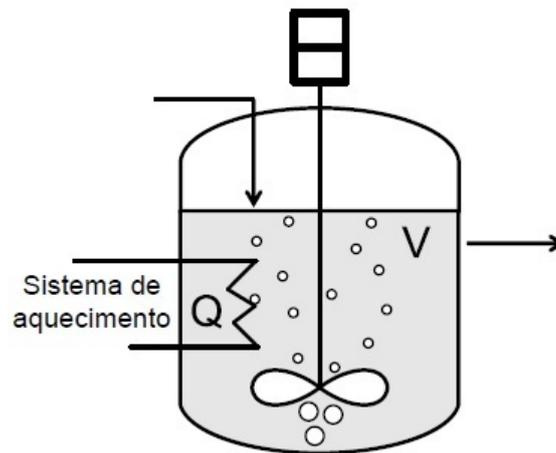


Figura 17: Ilustração de um modelo simplificado do tanque considerando vazões de entrada e saída (iguais pois o volume é constante), aquecimento e agitação.

Fonte: (Bojorge, 2013).

$$\frac{d\bar{T}(t)}{dt} + \frac{F}{V} \bar{T}(t) = \frac{1}{\rho V C_p} \bar{Q}(t) \quad (1)$$

A Equação 1 denota o modelo utilizado com as variáveis observadas nos tanques de camarões da EMA em função do tempo. Entre os lados da igualdade estão as saídas e entradas de energia do sistema, respectivamente. F é a vazão de entrada e saída, V o volume, ρ a densidade da água e C_p o calor específico da água, estes constantes. $\bar{T}(t)$ e $\bar{Q}(t)$ representam a temperatura de saída e a quantidade de calor inserida na entrada, respectivamente. A variável que descreveria a temperatura inicial é invariante no tempo portanto não faz parte da modelagem matemática para a determinação da função de transferência.

A função de transferência requerida para as devidas simulações é obtida após a submissão do modelo matemático ao operador Laplaciano. A transformada de Laplace troca o domínio da equação passando-a do domínio do tempo para o da frequência complexa, permitindo assim, a análise do comportamento dinâmico do modelo no regime transitório. No entanto, para realizar essa operação matemática, o modelo adotado deverá ser encontrado sob uma forma específica, dada por:

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K u(t - \theta) \quad (2)$$

onde τ é a constante de tempo (expressa em s), K é o ganho do modelo (expresso em

$s.^{\circ}C MJ$), θ é o tempo de atraso (expresso em s), y é a saída do sistema (expressa em $^{\circ}C$) e u é a entrada de controle do sistema (expressa em MJ).

O tempo morto (ou *delay*) é o tempo de atraso existente entre o início da ação de controle e a observação da influência desta ação na resposta do sistema, ou seja, ao proporcionar uma ação através do resistor de aquecimento, o tempo de detecção pelos sensores desta ação é o tempo de atraso.

Então, manipula-se algebricamente a Equação 1 para aproximá-la da forma desejada, encontrando assim:

$$\frac{V}{F} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \frac{1}{F\rho C_p} u(t - \theta) \quad (3)$$

Após o devido rearranjo proposto, são definidos os termos τ e K :

$$\tau = \frac{V}{F} \quad (4)$$

$$K = \frac{1}{F\rho C_p} \quad (5)$$

Portanto, aplicando a transformada de Laplace ao modelo encontrado sob a forma desejada, obtém-se a Equação 6. Assim, a função de transferência que representa o sistema real, considerando as variáveis e dimensões dos tanques da EMA, é determinada, permitindo então, a simulação dinâmica e o dimensionamento do sistema de geração de energia elétrica renovável fotovoltaica.

$$\frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{K \cdot e^{-s\theta}}{\tau s + 1} \quad (6)$$

Os valores reais destas variáveis para o tanque considerado neste trabalho são apresentados a seguir:

$$V = 16m^3 \quad (7)$$

$$F = 5 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s} \quad (8)$$

$$\rho = 10^3 \frac{kg}{m^3} \quad (9)$$

$$C_p = 4.184 \frac{J}{kg \text{ } ^{\circ}C} \quad (10)$$

$$\theta = 3000s \text{ (adotado)} \quad (11)$$

Assim, substituindo os valores reais dos parâmetros na Equação 6 obtém-se a função de transferência do sistema:

$$\frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{47,8}{3200s + 1} \cdot e^{-3000s} \quad (12)$$

3.3 Controlador proporcional, integrativo e derivativo (PID)

Os controladores de temperatura frequentemente utilizados são do tipo *On-Off*. Eles oferecem, geralmente, controle de potência executado pela variação da tensão alternada aplicada a resistência (Raimo, 2007). Os controladores *On-Off* operam conforme um valor de *set point*, ou seja, o controle é acionado ou desacionado a partir de uma condição preestabelecida. O maior impasse nestes tipos de controladores é que eles nunca atingem a estabilidade, isto é, ficam oscilando em torno do valor desejado. Logo, processos que necessitam de precisão não podem usar este tipo de controle, pois há incerteza acerca do valor final (Pereira, 2017).

Analogamente, muitos processos industriais, inclusive os de temperatura, são controlados pelos controladores PID que combinam ações proporcional, integral e derivativa (Ogata, 2011). O processo de selecionar os parâmetros (ações) do controlador que garantam uma dada especificação de desempenho é conhecido como sintonia do controlador (Bezerra, 2010).

O método de Ziegler Nichols, baseado na curva de reação, é um dos mais utilizados na sintonia inicial de controladores. Este método foi concebido através da análise gráfica da resposta da planta, em malha aberta, a uma entrada do tipo degrau unitário (Vargas et al., 2013). No entanto, através deste método, a resposta da planta ao degrau unitário apresenta uma oscilação em regime transitório que atinge um sobressinal superior a 20%. Outro método utilizado é o CHR, que foi desenvolvido no *Massachusetts Institute of Technology* - MIT, sendo o primeiro método que considerou um modelo aproximado de primeira ordem com tempo de atraso (Saraiva, 2011). Assim adota-se a sintonia através do método CHR para o controlador PID deste trabalho. Na Tabela 1 são demonstrados como são definidos os parâmetros K_p , T_i e T_d de acordo com o método CHR.

Tabela 1: Equações para especificação de parâmetros de controladores PID conforme método CHR.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{0,3\tau}{K\theta}$	∞	0
PI	$\frac{0,35\tau}{K\theta}$	$1,16\tau$	0
PID	$\frac{0,6\tau}{K\theta}$	τ	$\frac{\theta}{2}$

Fonte: Adaptação de Vargas et al. (2013)

Onde K é o ganho estático, τ é a constante de tempo e θ é o tempo de atraso adotado ou medido. Portanto, a partir destes parâmetros obtidos na função de transferência definida na Equação 12, são determinados os parâmetros K_p , T_i e T_d através do método CHR. Após a sintonia, foi realizado um ajuste fino no tempo integral T_i controlador para obter-se uma resposta da planta ao degrau unitário com um sobressinal menor. O controlador

sintonizado é obtido através da Equação 13 onde cada termo representa, respectivamente, os ganhos proporcional (Kp), integral (Ki) e derivativo (Kd).

$$C(s) = Kp + \frac{Kp}{Ti(s)} + Kp.Td(s) \quad (13)$$

Portanto, aplicando os parâmetros Kp , Ti e Td na Equação 13 foram encontrados os seguintes ganhos:

$$Kp = 0,013 \quad (14)$$

$$Ki = 3,5.10^{-6} \quad (15)$$

$$Kd = 20,1 \quad (16)$$

Para observar a resposta da planta ao degrau unitário em malha fechada com realimentação unitária, com o controlador sintonizado e ajuste fino, foi utilizada a ferramenta *Simulink* do *software Matrix Laboratory - MATLAB*®. O diagrama de blocos criado no *Simulink* e a resposta ao degrau unitário são apresentados nas Figuras 18 e 19 respectivamente.

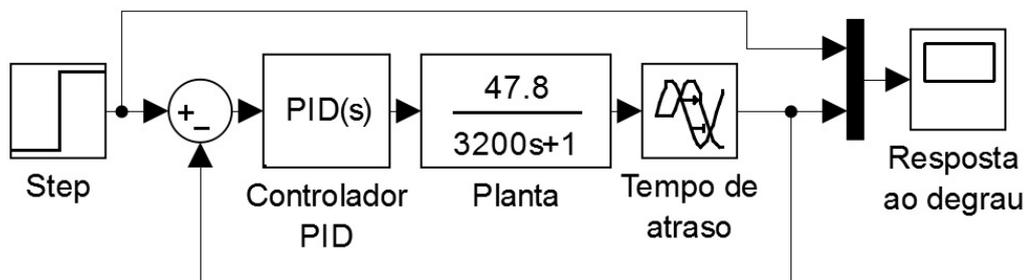


Figura 18: Diagrama de blocos da planta desenvolvido no *Simulink* com controlador PID em malha fechada com realimentação unitária e tempo de atraso.

Apesar do projeto do controlador para a planta desse trabalho não ser o objetivo principal, entende-se que, através de um controlador bem sintonizado, a energia necessária para a manutenção da temperatura nos tanques de criação de camarões será menor.

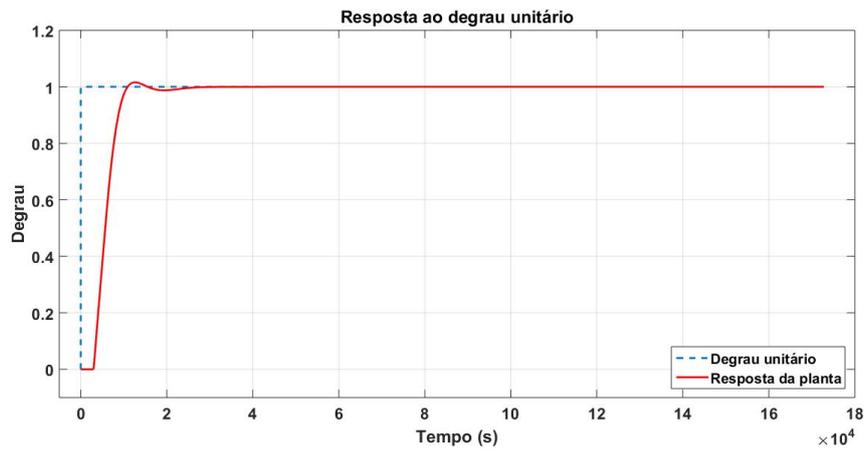


Figura 19: Resposta à entrada degrau com controlador PID sintonizado pelo método CHR com ajuste fino do tempo integral.

4 METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico depende inicialmente da quantidade de cargas instaladas relacionadas ao tempo de uso das mesmas. Em sistemas residenciais e comerciais estes dados podem ser obtidos através de um simples levantamento das cargas já que o comportamento típico de uso é geralmente conhecido. Em contrapartida, sistemas industriais englobam cargas variáveis em função da demanda pelos serviços ou produtos que o mesmo pode fornecer. No mesmo contexto, o sistema fotovoltaico necessário ao suprimento do sistema de aquecimento de um tanque de camarões depende da quantidade de energia em forma de calor que será transferida à água do tanque.

Portanto, com base no modelo do tanque de criação de camarões, dados de temperatura e do tempo de atraso, pretende-se dimensionar um sistema fotovoltaico para suprir a demanda de energia para aquecimento deste tanque. Será criada também uma aplicação através de uma interface no *software* MATLAB que simplifique este dimensionamento.

Ademais, adotou-se que o sistema de aquecimento, o qual é abordado neste trabalho, deve entrar em funcionamento na sequência da processo de criação natural, baseado nos períodos de altas temperaturas. Então, o sistema entrará em funcionamento após o período do último ciclo natural de criação de camarões. Considera-se, portanto, que a temperatura inicial da água para o dimensionamento do sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica é de 24°C.

Em alguns sistemas de aquecimento, o controlador do tipo *On-Off* é o mais utilizado, consistindo no acionamento da totalidade de potência de aquecimento disponível quando a medição da temperatura encontra-se abaixo de um valor de referência. Um exemplo do cálculo da quantidade de calor necessária para a elevação da temperatura da água em 1°C é demonstrado na Equação 17. A massa de água utilizada é de 16000 kg, de acordo com o volume do tanque real da EMA.

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$Q = 16000 \cdot 4184 \cdot 1$$

$$Q = 66,9MJ \quad (17)$$

No entanto, essa quantidade de calor seria suficiente para elevação da temperatura da água em 1°C apenas, não sendo possível afirmar por quanto tempo e quantas vezes o sistema seria acionado diariamente. Logo, um controlador *On-Off* pode não atender alguns requisitos de projeto, como por exemplo, a redução na oscilação da resposta permanente de um sistema. Devido a isso, no Capítulo 3 foi proposto um controlador PID, que baseia-se no acionamento proporcional, integral e derivativo do sistema de aquecimento, à medida em que há necessidade. Logo, a partir da leitura deste acionamento do controlador PID, obtém-se naturalmente a quantidade de calor necessária para a manutenção da temperatura da água dos tanques de criação de camarões.

Portanto, para dimensionar o sistema fotovoltaico deve-se conhecer a ação de controle que o controlador sintonizado utilizará ao longo do tempo. Entretanto, essa ação de controle é dependente da variação de temperatura que ocorrerá na água advinda das perturbações exteriores, principalmente da temperatura ambiente. Logo, o comportamento dessas perdas deve ser conhecido para que o controlador gere uma ação de controle precisa capaz de atingir o objetivo da manutenção da temperatura da água.

Complementarmente, o tempo de atraso, característico de sistemas térmicos com modelos matemáticos de primeira ordem, deve ser conhecido. Então, é necessário realizar medições de temperatura ambiente e da água para conhecer seus comportamentos que devem influir na ação de controle e conseqüentemente no dimensionamento do sistema fotovoltaico.

Além disso, um dos fatores que contribuem significativamente para o sucesso do dimensionamento de um sistema de geração de energia fotovoltaica é o potencial da radiação solar global da localidade prevista. Para este trabalho será utilizado o banco de dados da leitura do piranômetro da estação climatológica da Embrapa da cidade de Pelotas/RS, distante, aproximadamente, 70km da EMA. Considerando que a EMA e a estação climatológica da Embrapa estão no mesmo ponto, através dos dados de irradiação em W/m^2 obtidos entre os meses de março de 2016 a fevereiro de 2017, pretende-se concluir quanto à capacidade de geração fotovoltaica. A Tabela 2 a seguir mostra os dados coletados na referida estação da climatológica.

De acordo com os dados da Tabela 2, observa-se que para módulos fotovoltaicos com área de $1,65m^2$, a energia elétrica máxima mensal gerada será de, em média, $28,32kWh$ na região citada.

Caso as variáveis que causam perda de temperatura e atraso não sejam conhecidas, o controlador atuará até a convergência da saída à temperatura de referência, permanecendo estático após. Na Figura 20 é demonstrado um diagrama de blocos construído na ferramenta *Simulink* do MATLAB com a planta sem as variáveis que causam perdas. O tempo de atraso adotado é de 3000 segundos, a temperatura inicial da água e a de re-

Tabela 2: Médias do banco de dados das leituras mensais do piranômetro da Embrapa Pelotas/RS.

Mês 2016 à 2017	Radiação solar ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)	Radiação solar ($\text{kW.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)	Potência elétrica máxima em $1,65\text{m}^2$ (kW)	Potência elétrica máxima mensal (kW - $\eta = 0,15$)
Março	258,9	3,01	4,97	22,36
Abril	204,8	2,38	3,93	17,69
Mai	177,6	2,07	3,41	15,33
Junho	206,2	2,40	3,96	17,81
Julho	193,8	2,25	3,72	16,73
Agosto	275,3	3,20	5,28	23,77
Setembro	343,7	4,00	6,60	29,68
Outubro	343,7	4,00	6,60	29,68
Novembro	537,4	6,25	10,32	46,43
Dezembro	543,1	6,32	10,42	46,90
Janeiro	514,8	5,99	9,88	44,45
Fevereiro	437,7	3,91	6,45	29,05
Média	336,4	3,81	6,29	28,32

Adaptação: Estação Climatológica Embrapa Pelotas/RS

ferência são consideradas, respectivamente, 24 e 28°C. A resposta da planta e a ação de controle são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 21 e 22. Observa-se que após um determinado tempo, não há alteração em ambos sinais.

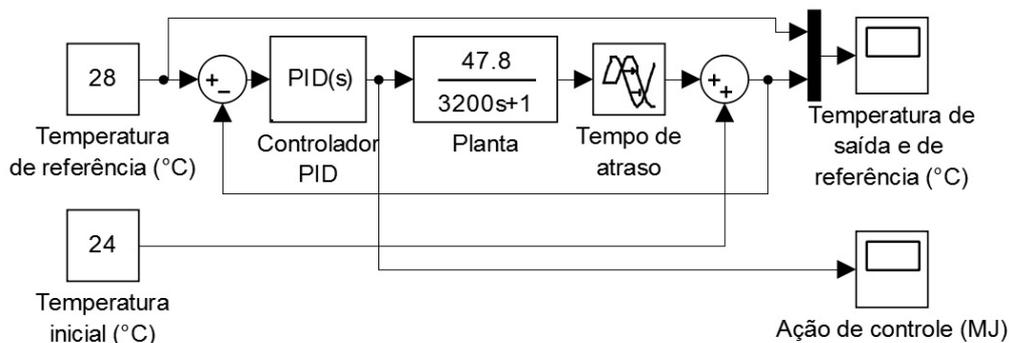


Figura 20: Planta em malha fechada com controlador PID, temperatura inicial e de referência e tempo de atraso desconsiderando as perdas na temperatura da água.

A partir dos dados representados na Figura 22, realiza-se o somatório da função de aquecimento, isto é, somente quando há incremento de energia. Tal consideração deve-se ao fato do sistema proposto não atuar no resfriamento da temperatura da água. A partir da análise gráfica são considerados dois intervalos os quais referem-se a ações de aquecimento, resultando na Equação 18.

$$Q_t = \sum_{i=0}^{5000} Q_i + \sum_{j=12500}^{22500} Q_j = 1241 MJ \quad (18)$$

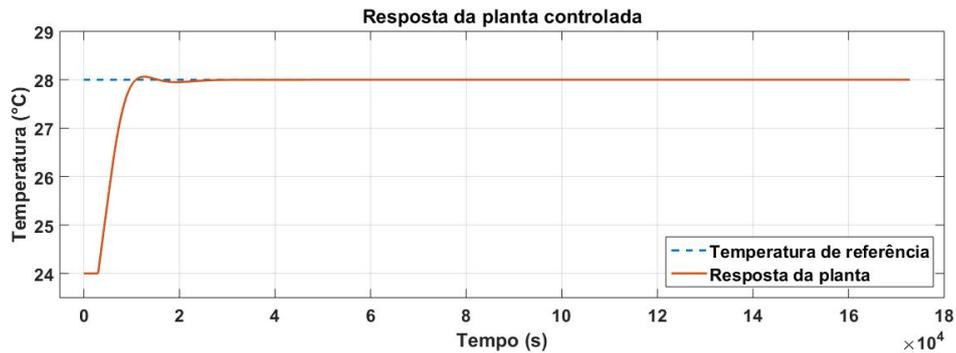


Figura 21: Resposta da planta controlada e consequente manutenção da temperatura .

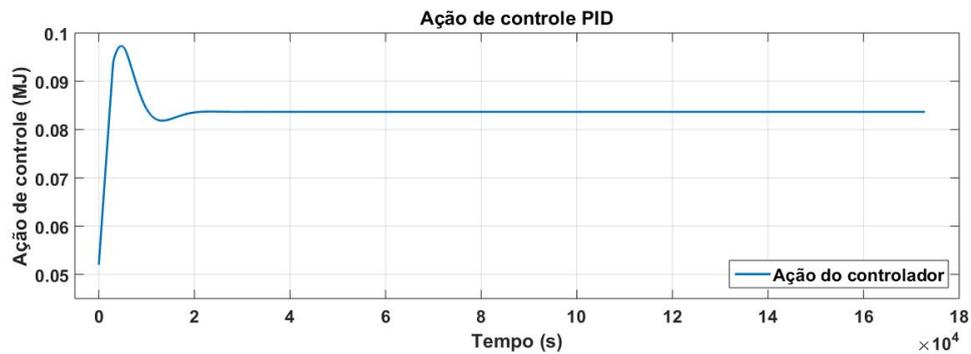


Figura 22: Ação de controle PID sobre a planta refletindo o controle atuante.

sendo Q_i e Q_j as parciais temporais da quantidade de calor e Q_t a quantidade de calor total necessária durante os intervalos considerados;

No entanto para dimensionar o sistema fotovoltaico precisa-se converter essa energia em potência elétrica que será dissipada pelo resistor de aquecimento. Na Equação 19 é demonstrado o cálculo que define a potência elétrica que deverá ser utilizada para atingir-se a quantidade de calor no intervalo de tempo especificado.

$$P_{req} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{1241.10^6 J}{1.5.10^4 s} = 82,73 kW$$

onde P_{req} é a potência elétrica necessária.

Logo, tal potência elétrica deverá ser dissipada pelo resistor durante os intervalos de 0 a 5000 e 12500 a 22500 segundos de acordo com a análise gráfica da Figura 22.

Para exemplificar a metodologia para o dimensionamento fotovoltaico supõe-se que a potência calculada seja necessária a cada 2 dias, necessitando-se portanto, de 15 ciclos de aquecimento mensais com a utilização da energia calculada na Equação 19. Logo, a quantidade de energia anual, considerando-se os 4 meses de utilização efetiva no sistema de aquecimento, seria dada pela Equação 19.

$$E_{total} = P_{req} \cdot 15 dias \cdot 4 meses = 82,73 \cdot 15 \cdot 4 = 4964 kWh \quad (19)$$

Contudo, esta energia total será gerada durante os 12 meses do ano o que fraciona a geração mensal requerida para $413,6kWh$, isto é, o sistema de geração fotovoltaico deverá gerar mensalmente, em média, $413,6kWh$. Assim, o número de módulos fotovoltaicos necessários para o aquecimento do tanque de criação de camarões da EMA, segundo as condições estabelecidas e os dados da Tabela 2, é fornecido na Equação 22.

$$N_Mod = \frac{E_{total}}{E_{modulo}} \quad (20)$$

$$N_Mod = \left\lceil \frac{413,6}{28,3} \right\rceil \quad (21)$$

$$N_Mod = 15 \quad (22)$$

onde N_Mod é o número de módulos fotovoltaicos necessários para gerar a energia necessária dadas a condição de realização de um ciclo de aquecimento diário.

Assim, o dimensionamento considera 15 módulos com área de exposição a irradiação solar de $1,65m^2$, independente do fabricante. Para módulos com área de exposição de $2m^2$ seriam necessários 13 módulos, conservando assim, a área total de módulos fotovoltaicos expostos à irradiação solar em torno de $25m^2$ para ambos os casos.

Portanto, conhecendo-se a planta que representa o sistema real, o controlador ideal ao comportamento simulado e a capacidade de geração por módulo fotovoltaico resta analisar-se o comportamento da variação da temperatura da água e da temperatura ambiente, inferindo-se assim, o tempo de atraso real. Tais dados devem promover mudanças no comportamento dinâmico da planta, os quais serão apresentados no Capítulo 5.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Adicionalmente aos resultados iniciais, obtidos a partir da modelagem matemática do sistema termodinâmico analisado e do controle PID sintonizado, foram realizados experimentos *in loco* fundamentais à conclusão dos resultados deste trabalho. Tais experimentos creditarão ao modelo matemático, subsídios para o dimensionamento preciso do sistema fotovoltaico. Paralelamente ao dimensionamento elaborou-se uma aplicação computacional destinada ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para aplicações semelhantes, considerando-se as variáveis do sistema. Então, o sistema dimensionado por esta ferramenta suprirá a necessidade energética utilizada para o aquecimento de tanques de criação de camarões em períodos frios do ano.

O sistema de controle proposto anteriormente visa a manutenção da temperatura em uma determinada faixa, ótima ao crescimento dos camarões. No entanto, neste sistema de controle não haviam sido consideradas as variáveis que dispersam a quantidade de calor armazenada nos tanques. Ao inserir calor nos tanques através de resistores de aquecimento é necessário considerar as perdas oriundas da temperatura ambiente e do sistema de aeração presente nos tanques. Os resultados apresentados neste capítulo são compostos de medições de temperatura ambiente e da água que quantificam tais perdas e suas influências no sistema de aquecimento.

Na Figura 23 é demonstrado o tanque real da EMA utilizado para os experimentos deste capítulo com seu sistema de aeração acionado.

Portanto, medir e modelar o comportamento das temperaturas interna e externa ao tanque, tornou-se imprescindível ao resultado deste trabalho. Os ciclos de medições foram organizados para se obter os modelos das respostas de temperatura da água do tanque considerando como variáveis controladas o sistema de aquecimento e o sistema de aeração. O sistema de aquecimento utilizado nos experimentos é acionado através de um controlador do tipo *On/Off*, com temperatura mínima para acionamento de 28°C considerado um *threshold* de 0,25°C. Tais ciclos de medição foram concebidos no período de inverno, conforme as datas da Tabela 3, priorizando assim, a coleta de dados com diferentes combinações de variáveis indispensáveis ao processo.

Diariamente, o sistema utilizado na coleta dos dados armazenava 8640 leituras dos



Figura 23: Tanque instalado em estufa que foi utilizado nos experimentos.

Fonte: Autor

Tabela 3: Combinação proposta entre as variáveis para coleta de dados.

Data	Aeração	Aquecimento
9 a 11/7	desligada	ligado
11 a 13/7	desligada	desligado
13 a 15/7	ligada	desligado
15 a 18/7	ligada	ligado

Fonte: Autor

sensores de temperatura ambiente e temperatura da água. Foram coletadas mais de 75000 leituras dos sensores de acordo com a combinação proposta. Assim, o intervalo entre leituras armazenadas foi de 10 segundos, embora o controlador *Field Logger* utilizado tenha um tempo mínimo de discretização para leitura de suas portas analógicas ou digitais de 1 segundo. Através destas leituras pode-se obter, além dos modelos das temperaturas, ambiente e da água, o tempo de atraso ou tempo morto que é parte do modelo termodinâmico abordado. Além disso, cabe salientar que a temperatura ambiente referida nesse trabalho é a temperatura no interior da estufa onde os tanques estão acondicionados (no período de verão supera 60°C), e a temperatura da água refere-se a temperatura no interior do tanque real utilizado para os experimentos.

5.1 Protótipo experimental utilizado

Para obter os resultados planejados, além de sensores adequados às medições e resistores de aquecimento, foi necessário uma unidade de controle e acionamento. O *Field Logger* do fabricante Novus foi o dispositivo utilizado para o controle e armazenamento das informações obtidas juntos aos sensores de temperatura bem como o acionamento dos resistores imersos. O *Field Logger* possui entradas e saídas analógicas e digitais com ar-

mazenamento interno e entrada para cartões de armazenamento além de comunicação no padrão *Modbus*. Possui também *interface* simples e intuitiva com circuitos condicionadores de sinais internos para diversos sensores de temperatura conforme ilustra a Figura 24. Na Figura 25 visualiza-se a *interface* do controlador na configuração do *setpoint* da temperatura para acionamento da saída de maior potência com tensão de 24VCC responsável pelo acionamento do sistema aquecimento. Entre o *Field Logger* e o contator de acionamento dos resistores de aquecimento foi utilizado um relé com bobina alimentada em 24VCC e capaz de acionar cargas com potência elétrica de até 2200W acionadas na tensão de 220VAC.

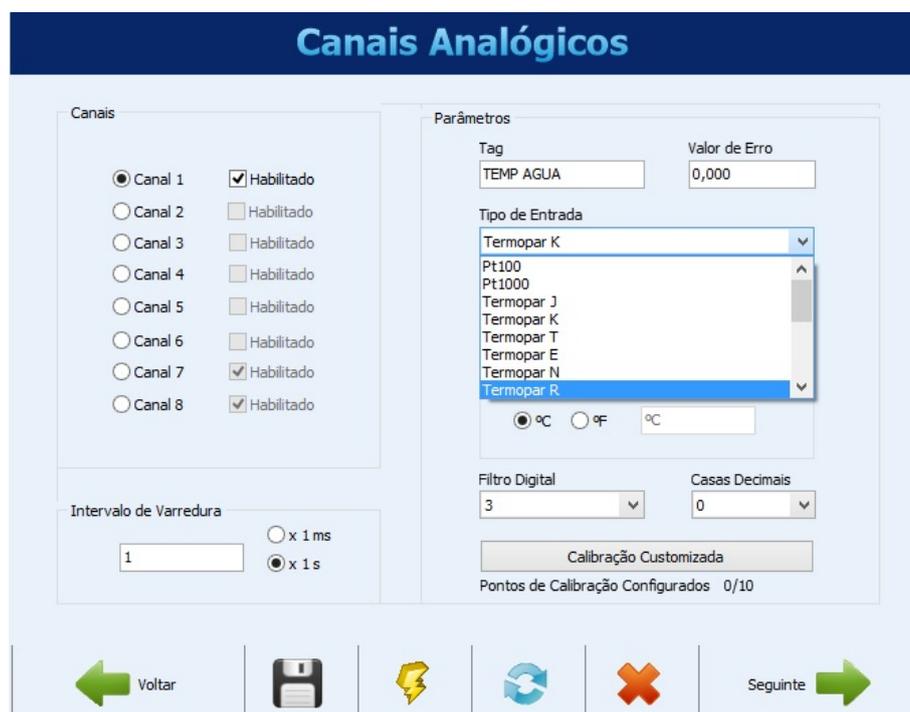


Figura 24: *Interface* do *Field Logger* com condicionadores de sinal para vários sensores de temperatura.

Fonte: Autor

Os sensores de temperatura utilizados foram os termopares tipo K e as termorresistências PT100 que possuem comportamento linear na faixa de temperatura de 0 à 40°C. As Normas Brasileiras, emitidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, (NBR 12771, 1999) e (NBR 13773, 2008) ratificam a linearidade dos termopares tipo K e dos termorresistores PT100 para faixa de temperatura mencionada. Assim, a utilização de dois tipos de sensores para cada variável medida permitiu avaliar a resposta mais adequada em cada caso. Outro fator preponderante para a escolha dos referidos sensores foi a disponibilidade no mercado. No entanto, foram adotados os resultados do termorresistor PT100, pois os termopares do tipo k alteram sua resposta com facilidade em função da utilização de materiais, como condutores de extensão, diferentes da liga de construtiva do mesmo. Os sensores imersos foram instalados com profundidade de aproximadamente

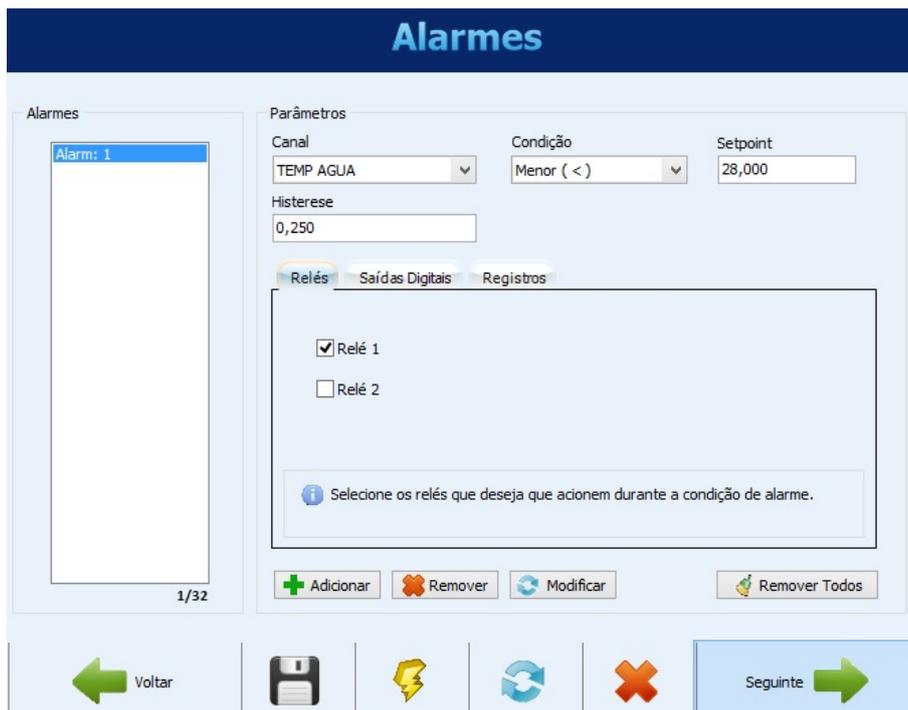


Figura 25: Tela da *interface* do *Field Logger* para definição dos limites de acionamento da saída analógica responsável pelo acionamento dos resistores de aquecimento.

Fonte: Autor

5cm enquanto os sensores externos foram instalados com distância aproximada de 30cm, um do outro, próximos a lona a qual o tanque é fabricado. A Figura 26 demonstra os dois sensores instalados para medição da temperatura ambiente e os dois para medição da temperatura da água.

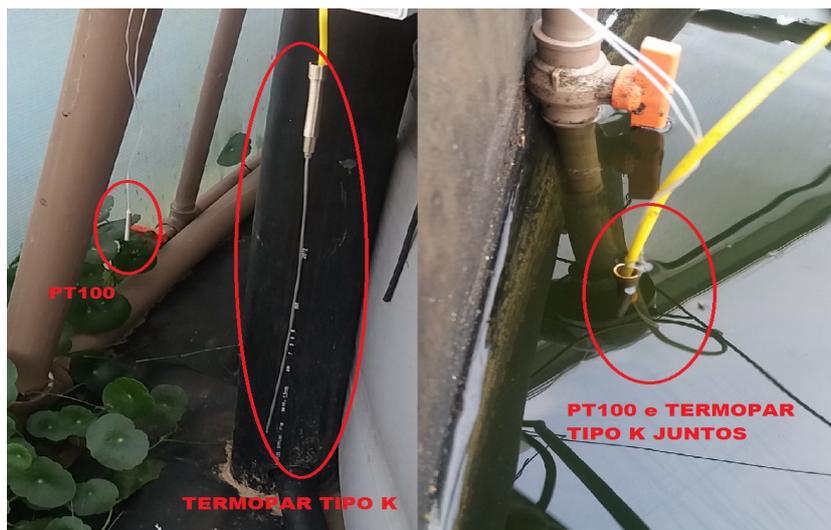


Figura 26: Sensores PT100 e termopar tipo K instalados aos pares no interior e fora do tanque.

Fonte: Autor

O sistema de aquecimento utilizado foi composto por dois resistores imersos associ-

ados em paralelo e instalados conforme demonstrado na Figura 27 distantes aproximadamente de 2 metros. Não há relatos na bibliografia da área relacionadas a morte de camarões em função do contato com a superfície aquecida dos resistores. A tensão e a corrente elétrica medidas no acionamento dos resistores podem ser verificados na Figura 28. A Equação 23 demonstra a potência elétrica dissipada pelo sistema de aquecimento utilizado no tanque durante os experimentos, ademais, a escolha dos resistores foi baseada na disponibilidade das unidades disponíveis na EMA.



Figura 27: Resistores de aquecimento instalados em paralelo imersos no tanque.
Fonte: Autor

$$P = V \cdot I = 204 \cdot 21,6 = 4406,4W \quad (23)$$

Na Figura 29 são demonstrados os componentes utilizados montados em um quadro de distribuição. O conjunto é baseado no *Field Logger* com as devidas proteções elétricas, relé de acionamento 24VCC (conforme saída do *Field Logger*), contator (bobina 220VAC) e bornes variados para as conexões.



Figura 28: Leituras do Voltímetro e do Amperímetro.
Fonte: Autor

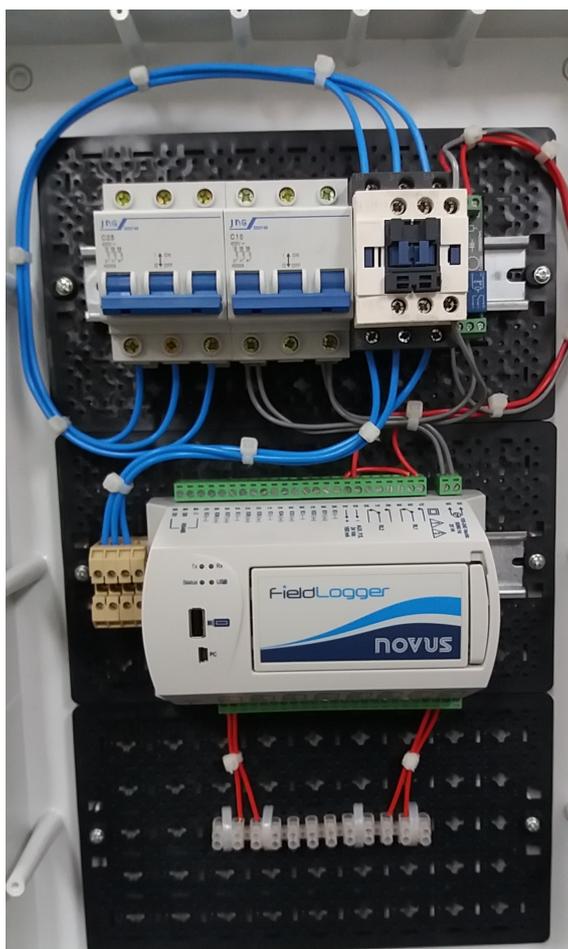


Figura 29: Sistema de controle e acionamento elaborado para os experimentos contendo o *Field Logger*, os disjuntores de proteção, o contator e o relé de acionamento para os resistores.

Fonte: Autor

5.2 Aquisição de dados das medições

A coleta de dados foi realizada exatamente durante o período frio o qual o sistema projetado deverá operar. Logo, espera-se que os dados coletados reflitam o comportamento típico para a época do ano. Considerando que a temperatura ambiente possui um comportamento típico como demonstrado na Figura 30, foi realizada uma média, considerando os dados diários entre 9 e 18/07/2017, compreendidos entre 00:00h e 23:59h.

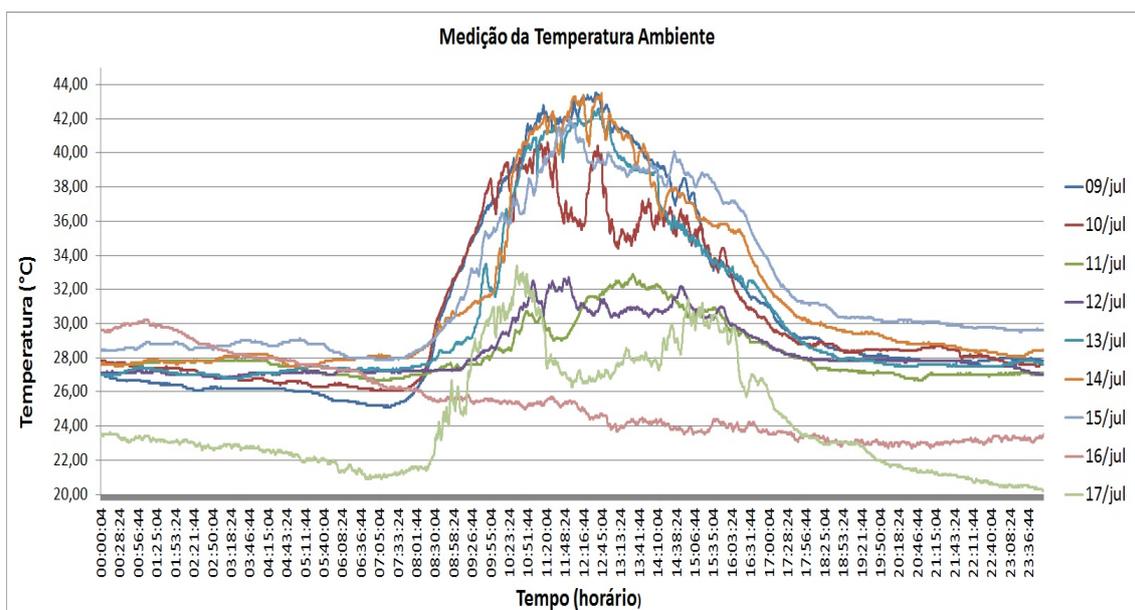


Figura 30: Leituras da temperatura ambiente coletada entre os dias 9 e 18/07/2017.

Fonte: Autor

Nesse contexto, a média foi realizada com os dados armazenados a cada 10 segundos. Foi calculado também os desvios padrões no mesmo período de amostragem. A curva da temperatura ambiente média, assim como as curvas dos desvios padrões podem ser visualizadas na Figura 31.

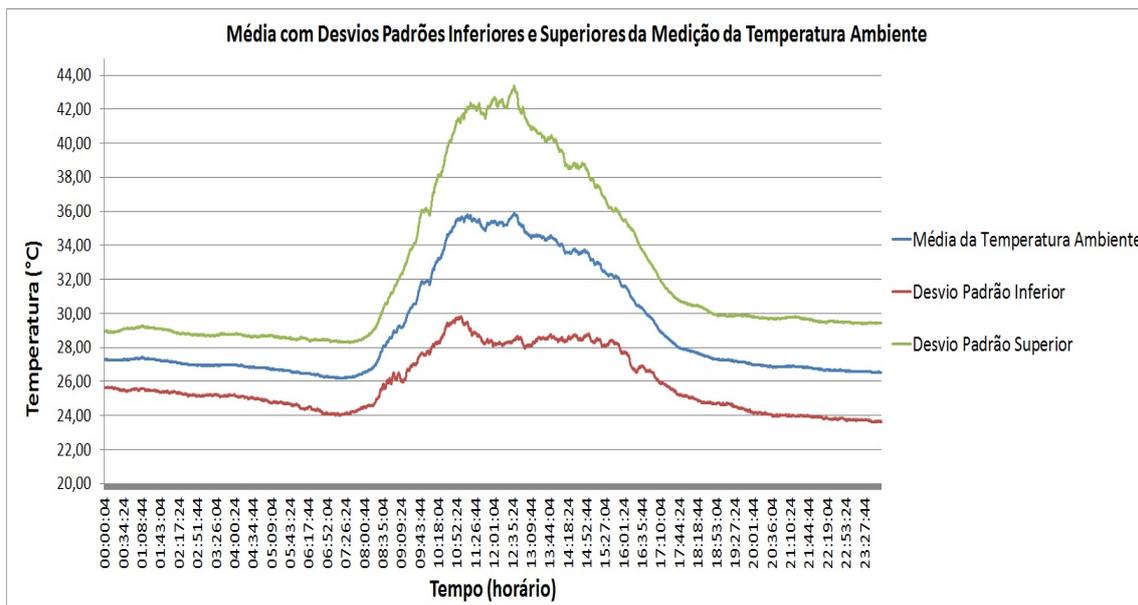


Figura 31: Temperatura ambiente média com desvio padrão inferior e superior.

Fonte: Autor

Com base nos dados da curva de temperatura ambiente média, demonstrados na Figura 31, utilizou-se uma ferramenta para modelar matematicamente tal comportamento. O *software* MATLAB possui uma ferramenta de aproximação chamada *Curve Fitting Tool*, que oferece diversas opções, referindo-se a equações matemáticas para gerar uma função capaz de representar, com um nível de confiança elevado, um determinado conjunto de dados.

Para o conjunto de dados da temperatura ambiente média inseridos na *Curve Fitting Tool* são apresentadas na Figura 32 as curvas relativas aos dados reais e à aproximação gerada. A equação Gaussiana de 5 termos foi a melhor aproximação gerada pela ferramenta, que utiliza diversos algoritmos para verificação e validação do conjunto de dados com relação à curva descrita pela equação. Desse modo, o eixo das coordenadas representa o número de leituras armazenadas, à medida que o eixo das abcissas descreve a variação da temperatura ambiente média.

A Equação 24 apresenta a equação de Gauss selecionada na ferramenta de aproximação *Curve Fitting Tool*.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i e^{[-(\frac{x-b_i}{c_i})^2]} \quad (24)$$

Onde:

i representa o número de termos (5);

a_i , b_i e c_i são as variáveis para cada termo; e

x é o número de leituras para cada dia (8640).

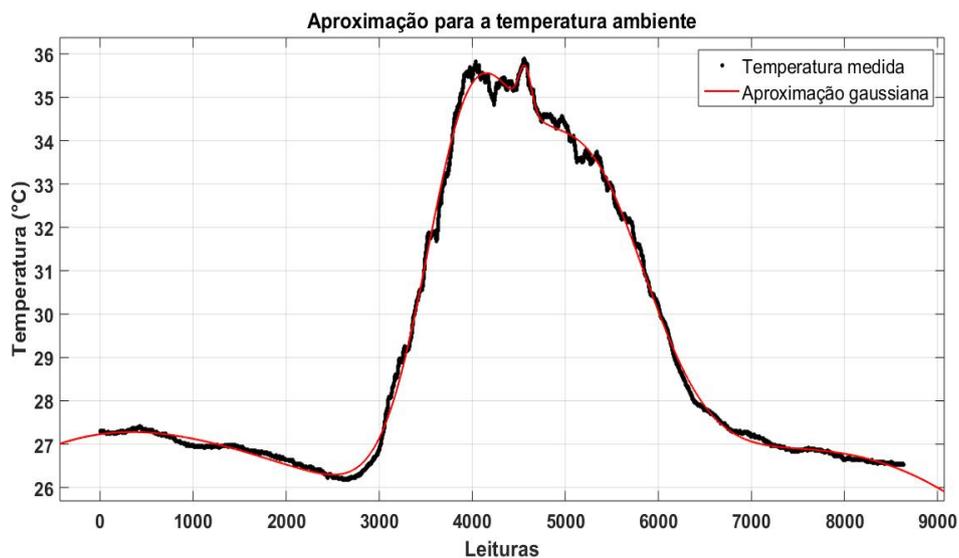


Figura 32: Modelo de aproximação gerado pela ferramenta *Curve Fitting Tool* do MATLAB para a temperatura ambiente média.

Fonte: Autor

Na Tabela 4 são apresentados os cinco termos de cada variável da equação de Gauss relativos à aproximação da curva da média de temperatura ambiente.

Tabela 4: Variáveis da equação de Gauss aproximados pela *Curve Fitting Tool* para a temperatura ambiente média.

Variável	Valor
a1	0.9742
b1	0.09944
c1	0.038
a2	7.753
b2	0.319
c2	0.4133
a3	7.313
b3	-0.1512
c3	0.275
a4	23.6
b4	-2.116
c4	2.146
a5	25.46
b5	1.648
c5	2.546

Fonte: Autor

É importante destacar que cada leitura representa horários com intervalos de 10 segundos iniciando-se às 00:00h de cada dia. Logo, a Equação 24 é função do tempo, como pode ser observado na Figura 30, onde nota-se que próximo às 12:00h tem-se, geralmente, o registro do pico da temperatura ambiente.

Analogamente à temperatura ambiente, a temperatura da água possui um comportamento semelhante. A Figura 33 demonstra os dados da temperatura da água coletados entre os dias 9 e 18/7 com análise idêntica a da temperatura ambiente. Na Figura 34 demonstra-se a curva média da temperatura da água a qual foi utilizada para geração do modelo baseado na equação de Gauss. A Figura 34 também apresenta os desvios padrões inferior e superior com relação aos dados coletados.

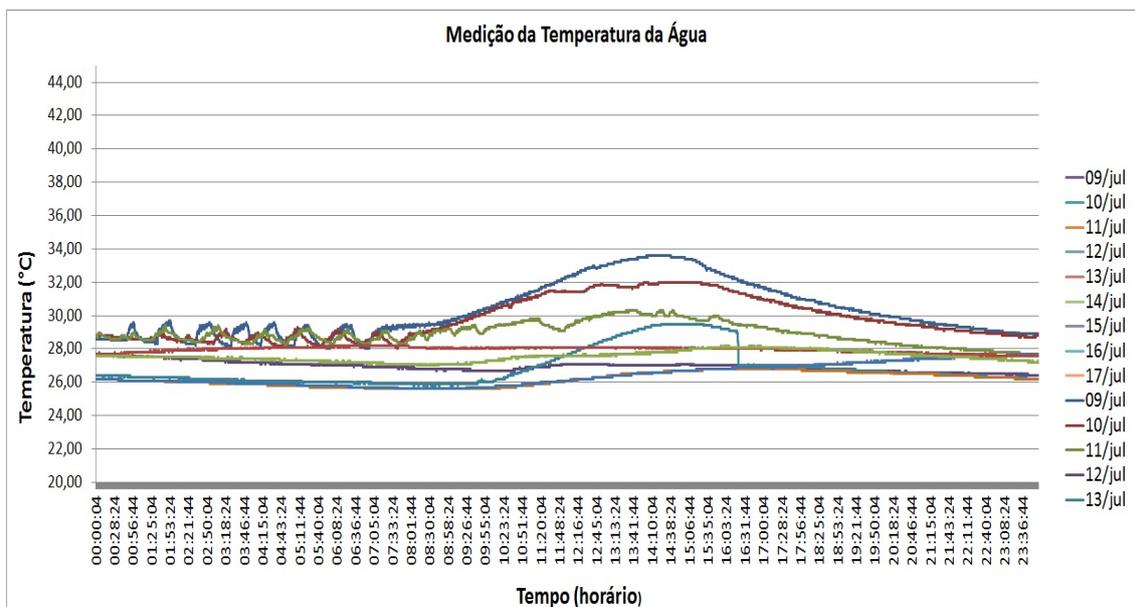


Figura 33: Leituras da temperatura da água entre 9 e 18/07/17.
Fonte: Autor

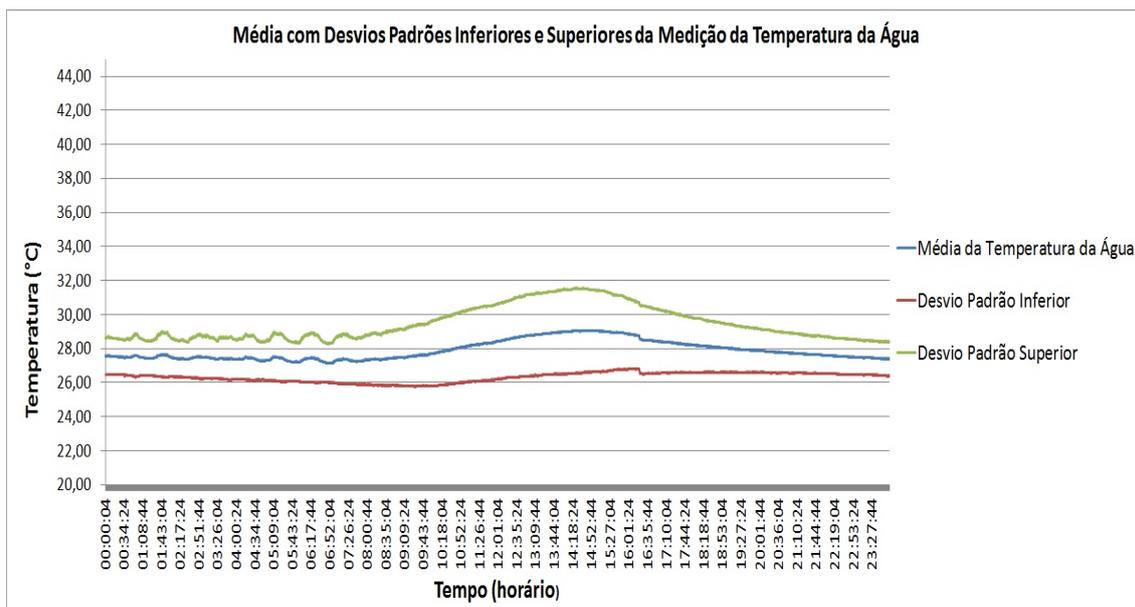


Figura 34: Temperatura média da água com desvio padrão inferior e superior.
Fonte: Autor

O conjunto de dados para temperatura da água foi importado na ferramenta *Curve*

Fitting Tool para a geração do modelo matemático baseado na equação de Gauss. Analogamente ao processo anterior e baseado na Equação 24, foi gerado o modelo para a temperatura da água conforme apresentado na Figura 35.

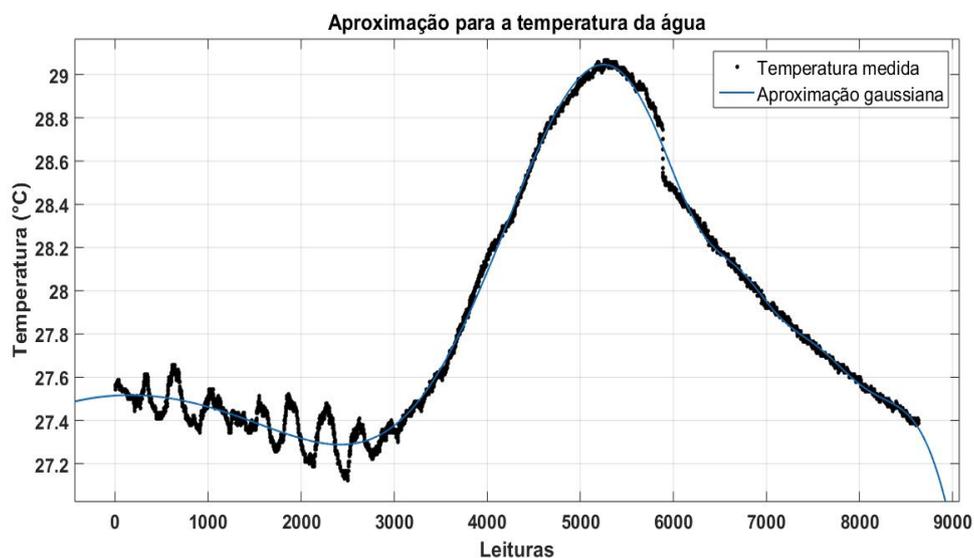


Figura 35: Modelo de aproximação gerado pela *Curve Fitting Tool* do MATLAB para a temperatura média da água.

Fonte: Autor

Na Tabela 5 são apresentados os 5 termos de cada variável da equação de Gauss relativos à aproximação da curva da média de temperatura da água.

Tabela 5: Variáveis da equação de Gauss aproximados pela *Curve Fitting Tool* para a temperatura média da água.

Variável	Valor
a1	3.868
b1	5638
c1	1900
a2	27.52
b2	147
c2	17740
a3	1.188
b3	7449
c3	770.6
a4	0.3673
b4	6740
c4	476.4
a5	5.293
b5	5941
c5	1420

Fonte: Autor

Com o experimento, o tempo de atraso ou tempo morto pode efetivamente ser analisado de acordo com as curvas de temperatura ambiente e temperatura da água medidas. Para o dimensionamento inicial do sistema fotovoltaico foi adotado um tempo de atraso de 3000 segundos, o qual foi utilizado para realizar as simulações da planta com o controlador sintonizado e refinado. No entanto, com as medições realizadas, para obter-se o resultado do tempo de atraso aproximado, foram comparadas duas combinações propostas na Tabela 3: os dados coletados entre 11 e 13/07/2017 e entre 13 e 15/07/2017. Tal comparação deve fornecer subsídios para compreender se o sistema de aeração comporta-se elevando ou reduzindo o tempo de atraso. Nas Figuras 36 e 37 são demonstrados graficamente quais os tempos de atraso nos casos mencionados de acordo com os dados coletados e selecionados para a referida análise.

Ao analisar-se as Figuras 36 e 37 pode ser observado que o maior tempo de atraso é dado pelo sistema com aeração ligada. Portanto, considerando que esta é a situação real de operação dos tanques de criação de camarões da EMA, o tempo de 9040 segundos será o tempo de atraso adotado para as simulações e dimensionamentos que seguem.

É importante lembrar que o sistema de aeração é vital à sobrevivência dos camarões funcionando, portanto, 24 horas diárias. A dúvida com relação ao comportamento do sistema de aeração e o tempo de atraso é originada em função do soprador de ar do mesmo emitir ar quente para tal função. Logo, como pode-se perceber na Figura 37, o tempo de

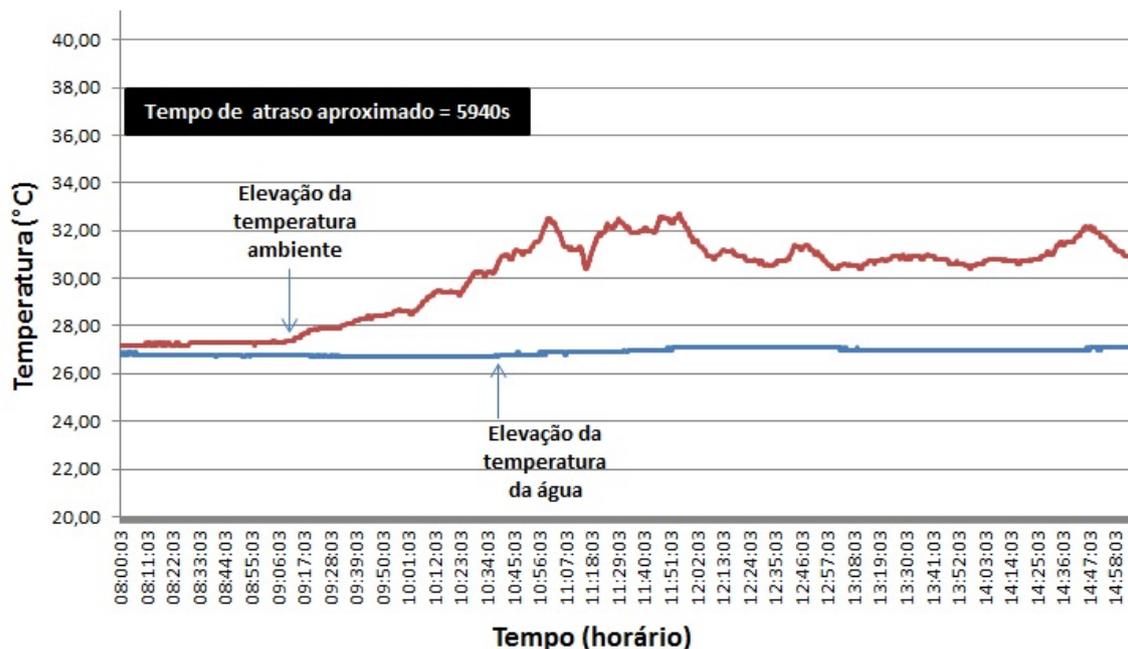


Figura 36: Aproximação gráfica do tempo de atraso considerando os sistemas de aeração e aquecimento desligados.

Fonte: Autor

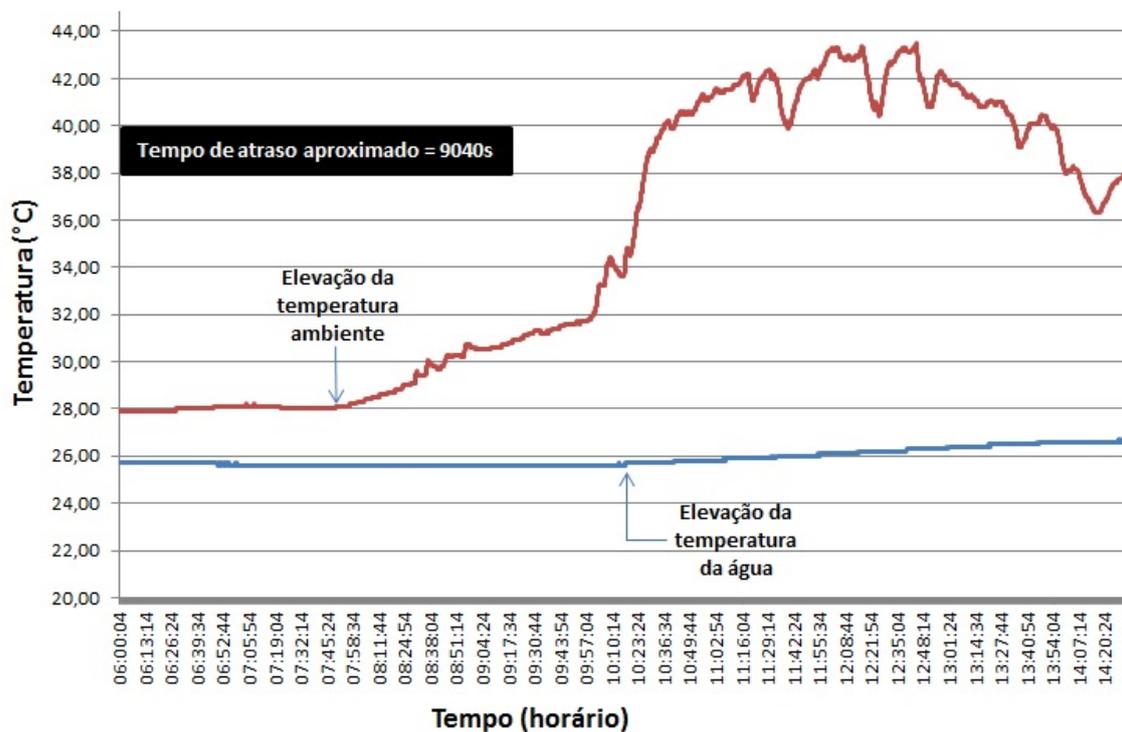


Figura 37: Aproximação gráfica do tempo de atraso com sistema de aeração ligado e de aquecimento desligado (situação operacional real da EMA).

Fonte: Autor

atraso com o sistema de aeração ligado é maior, ou seja, há aumento do tempo de atraso em função da aeração.

5.3 Análise dos dados coletados

A importância dos dados coletados no período de 9 a 17/07/2017 pode ser resumida ao conhecimento do comportamento típico das temperaturas ambientes e da água com o tempo de atraso. Estas variáveis são imprescindíveis ao correto dimensionamento do sistema fotovoltaico pois configuram a soma das perturbações que afetam a manutenção da temperatura da água dos tanques de criação de camarões.

A impossibilidade da validação do modelo matemático proposto ocorreu em função da dinâmica lenta do sistema de aquecimento promovida pelos resistores disponíveis para os resultados práticos. A potência aplicada ao volume de água não era suficiente para atingir a temperatura de *setpoint*, já que durante a noite, através da queda da temperatura ambiente, o sistema perdia o calor armazenado durante o dia.

Então, através da planta dimensionada a partir da modelagem matemática que recebeu a adição das perdas no sistema, dada pelas medições de temperatura ambiente e da água realizadas, o controlador PID foi resintonizado, subsidiado pelo novo tempo de atraso levantado. Um controlador que possa rejeitar a perturbação ou as perdas no sistema pode apresentar melhores resultados com relação à energia dissipada para manutenção da temperatura da água. Logo, adotando o tempo de atraso de 9040 segundos, os novos ganhos Kp , Ki e Kd são:

$$Kp = 0,004 \quad (25)$$

$$Ki = 1,15 \cdot 10^{-6} \quad (26)$$

$$Kd = 20,07 \quad (27)$$

Na ferramenta *Simulink* do MATLAB foi proposto o novo projeto conforme mostra a Figura 38.

As Figuras 39 e 40 apresentam respectivamente a resposta da planta com controle PID, a referência de temperatura e a perturbação gerada pela temperatura ambiente na temperatura da água, ou seja, a variação percebida pela temperatura da água ocasionada pela temperatura ambiente.

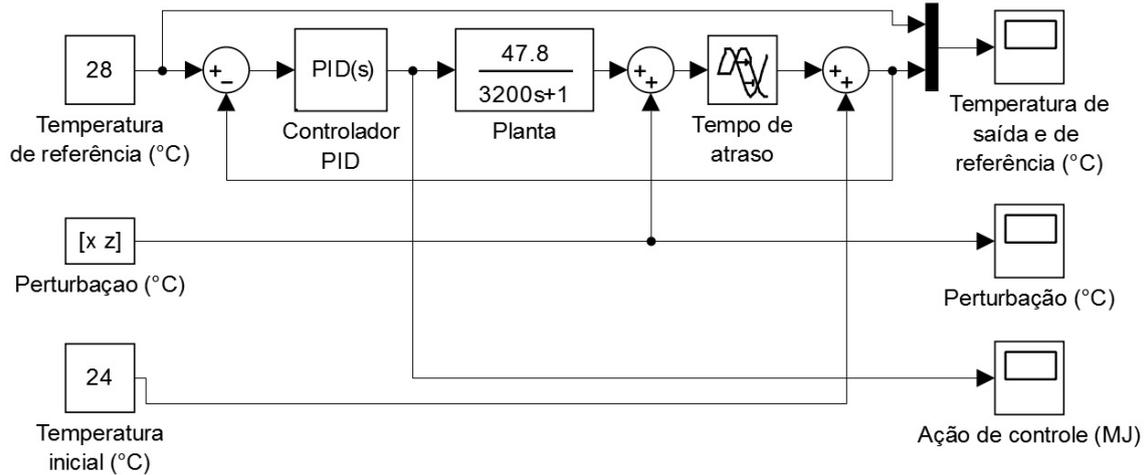


Figura 38: Planta final em malha fechada com controle PID, temperaturas inicial e de referência, tempo de atraso e perturbação (perdas).

Fonte: Autor

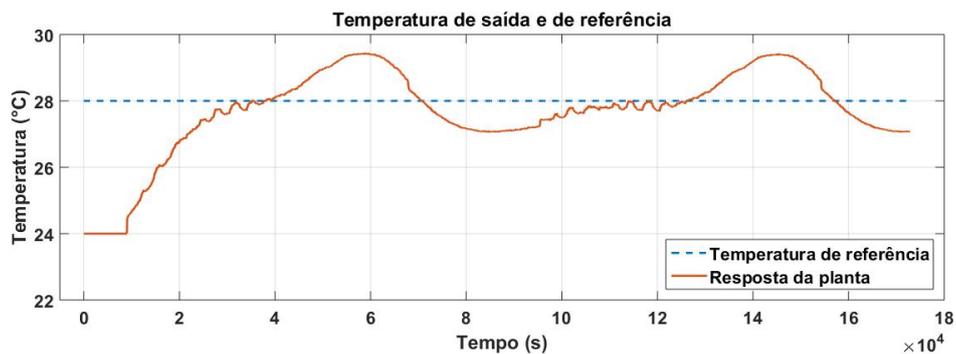


Figura 39: Resposta da planta ao sistema completo com as perdas, temperaturas inicial e de referência.

Fonte: Autor

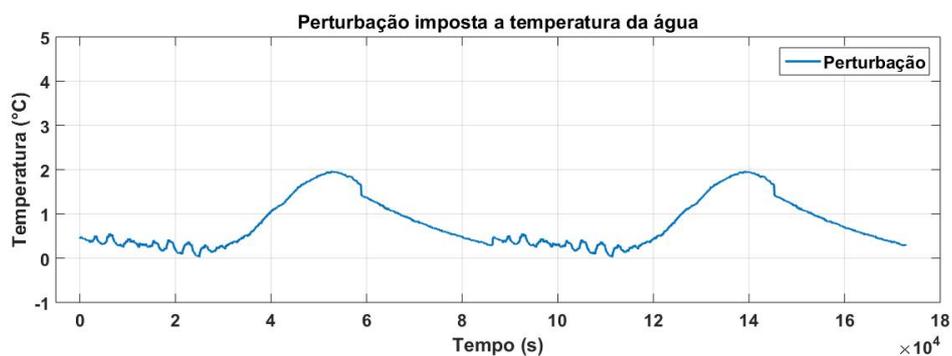


Figura 40: Perturbação (perdas) impostas à temperatura da água do tanque pela variação da temperatura ambiente dentro da estufa.

Fonte: Autor

Algumas soluções para conservação da quantidade de calor armazenada podem ser

estudadas visando a redução das perdas que foram efetivamente medidas. Dentre elas, o isolamento térmico através do uso de poliuretano, assim como nos sistemas de armazenamento de água quente em escalas menores, podem contribuir para melhores resultados.

5.4 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

Para dimensionar o sistema fotovoltaico deve-se conhecer a ação de controle que pode ser vista na Figura 41 a partir de $6,5 \cdot 10^4$ segundos. Considerou-se este ponto inicial para análise da ação de controle pois descreve o entardecer (aproximadamente 18:00h) do primeiro dia, ou seja, período em que há o resfriamento natural da água do tanque. Assim sendo, este ponto sinaliza o início do comportamento da ação de controle, considerando a perturbação média dos dados coletados apresentada na Figura 40.

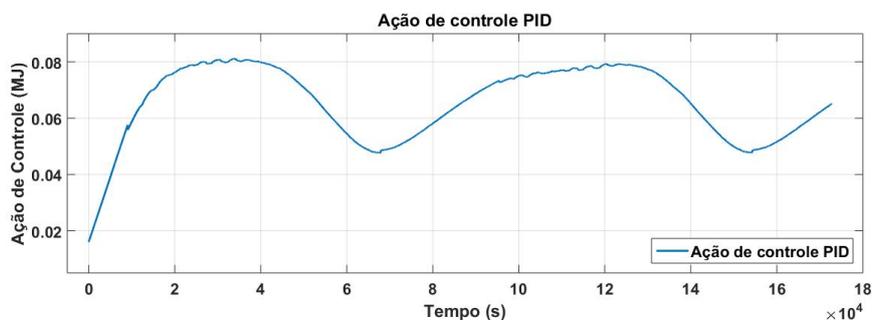


Figura 41: Ação de controle PID sobre a planta.

Fonte: Autor

Para este trabalho, o sistema de aquecimento não é capaz de retirar calor, ou seja, não reduz a temperatura da água. Por isso, o intervalo de tempo considerado para dimensionar o sistema fotovoltaico está entre 65000 e 125000 segundos. Considerando que um dia possui 86400 segundos, o intervalo supracitado correspondente ao intervalo entre 18 e 11h, coincidentes ao período da noite/madrugada onde ocorre queda da temperatura ambiente.

Então, para calcular a quantidade de calor necessária para efetuar o aquecimento da água, realiza-se um somatório da quantidade de calor no intervalo mencionado. A Equação 28 demonstra o valor encontrado.

$$Q_t = \sum_{i=65.000}^{125.000} Q_i = 4061,86 MJ \quad (28)$$

sendo Q_i as parciais temporais da quantidade de calor e Q_t a quantidade de calor total no intervalo dado;

No entanto para dimensionar o sistema fotovoltaico precisa-se converter essa energia em potência elétrica que será dissipada pelo resistor de aquecimento. Na Equação 29 é demonstrado o cálculo que define a potência elétrica que deverá ser utilizada para atingir-

se a quantidade de calor no intervalo de tempo especificado.

$$P_{req} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{4061,86 \cdot 10^6 J}{6 \cdot 10^4 s} = 67,69 kW \quad (29)$$

onde P_{req} é a potência elétrica necessária.

Logo, tal potência elétrica deverá ser dissipada pelo resistor durante o intervalo de 65.000 a 125.000 segundos conforme a Figura 41. Para o dimensionamento do resistor deve se considerar o valor máximo da função descrita pela ação de controle da planta. O valor máximo da função foi de $0,08126 MJ$, que representa, após as devidas conversões, um resistor com capacidade para dissipação de $4,88 kW$. O resistor de valor comercial $6 kW$, apresentado na Figura 42, do fabricante *Pentair*, pode ser adotado para o sistema de aquecimento proposto.

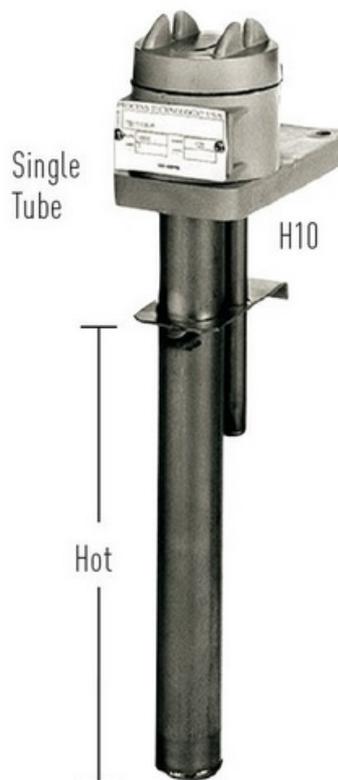


Figura 42: Aquecedor resistivo do fabricante *Pentair* com potência de $6 kW$.

Fonte: Autor

Então, considerando que a necessidade diária de potência elétrica é de $67,69 kW$, a Equação 30 demonstra a necessidade anual de energia, considerando-se os 4 meses de utilização efetiva no sistema de aquecimento.

$$E_{total} = P_{req} \cdot 30 dias \cdot 4 meses = 67,69 \cdot 30 \cdot 4 = 8122,80 kWh \quad (30)$$

Contudo, esta energia total será gerada durante os 12 meses do ano o que fraciona

a geração mensal requerida para $676,9kWh$, isto é, o sistema de geração fotovoltaico deverá gerar mensalmente, em média, $676,9kWh$. Assim, o número de módulos fotovoltaicos necessários para o aquecimento do tanque de criação de camarões da EMA, segundo as condições estabelecidas e os dados da Tabela 2, é fornecido na Equação 31.

$$N_Mod = \frac{E_{total}}{E_{modulo}} = \frac{676,9}{28,3} = 24 \quad (31)$$

onde N_Mod é o número de módulos fotovoltaicos necessários para gerar a energia necessária.

Assim, conforme o Capítulo 4, o dimensionamento considera 24 módulos com área de exposição a irradiação solar de $1,65m^2$, independente do fabricante. Para módulos com área de exposição de $2m^2$ seriam necessários 20 módulos, conservando assim, a área total de módulos fotovoltaicos expostos à irradiação solar em torno de $40m^2$ para ambos os casos.

5.5 Interface gráfica para dimensionamento

Objetivando-se aplicar o resultado deste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta gráfica computacional capaz de auxiliar produtores ou instituições de ensino no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos geradores de energia para aquecimento de tanques de criação de camarões em estufas.

A ferramenta foi desenvolvida no *software* MATLAB através do comando *guide* que deve ser digitado no *workspace* do mesmo. A etapa de criação é intuitiva sendo a programação realizada pela seleção de blocos com as funções desejadas e posterior inserção dos códigos relativos aos mesmos.

Após a seleção do projeto *default* é aberto o projeto inicial da interface gráfica conforme mostra a Figura 43. Inicialmente, deve-se salvar o projeto atribuindo-o um nome e que terá a extensão *.fig*. Automaticamente, a aplicação cria um arquivo com o mesmo nome porém com extensão *.m*, sendo o arquivo executável que deverá receber a programação para as funções dos blocos inseridos no projeto.

Então, verificou-se primeiramente a importância dos dados para o dimensionamento e quais seriam imprescindíveis para compor a *interface* projetada. Além disso, definiram-se as variáveis de entrada: volume, calor específico e temperatura inicial da água, assim como a potência máxima do resistor de aquecimento e a tensão de fase (N-F) da rede de distribuição da concessionária. Como dados fornecidos ao usuário, foram definidos: o número de módulos fotovoltaicos, a potência do inversor conectado a rede da concessionária, o disjuntor de proteção do inversor, o disjuntor de proteção do disjuntor dos módulos fotovoltaicos, o disjuntor de proteção do resistor de aquecimento e o percentual

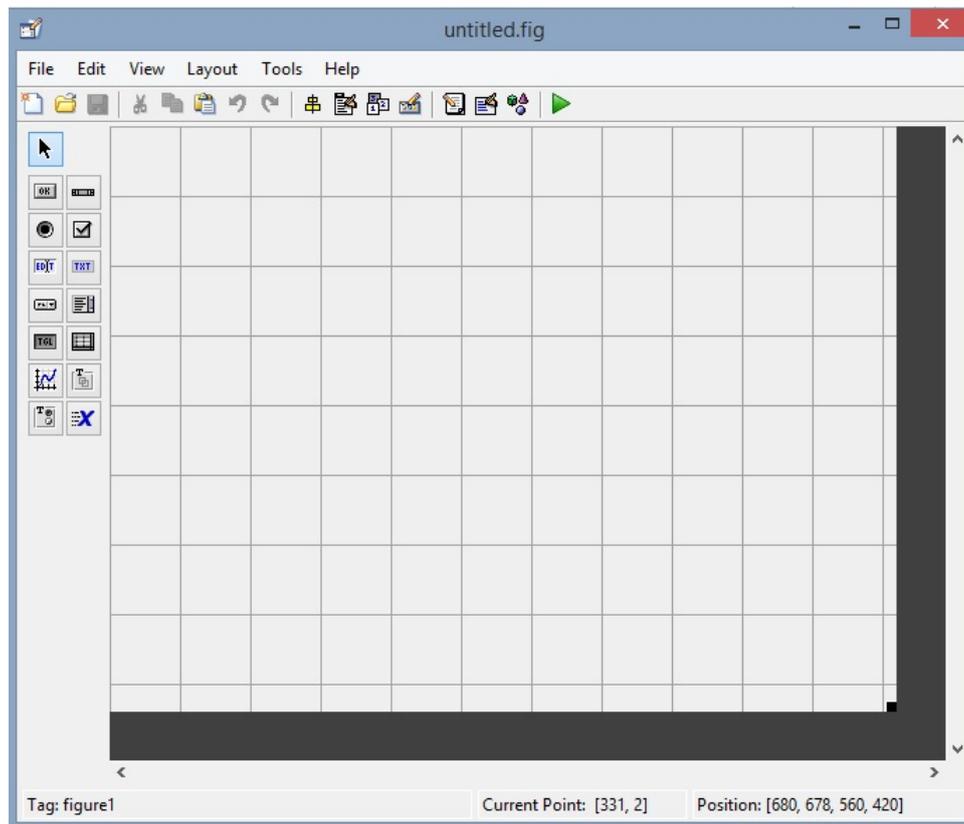


Figura 43: Projeto *default* com a tela inicial e os blocos de funções.
Fonte: Autor

de aproveitamento do resistor de aquecimento selecionado. O aproveitamento do resistor refere-se à precisão na escolha do resistor de aquecimento correto. Assim, o valor fornecido deverá estar próximo a 100% e seus múltiplos, garantindo o melhor dimensionamento. Exemplos: 89%, 195%, 499%, etc. Os múltiplos de 100% + 1 indicam o número de resistores selecionados que devem ser usados, como por exemplo: resistor selecionado de 1500W e o dado "Aproveitamento do resistor" apontou o valor 780%. Isto significa que deverão ser utilizados, em uma implementação real, 8 resistores de 1500W. Entretanto, se o percentual apresentado for muito inferior à 100%, a potência do resistor de aquecimento selecionado deverá ser reduzido. A Figura 44 demonstra a *interface* proposta e um exemplo de dimensionamento realizado pela mesma.

A ferramenta desenvolvida deverá possuir uma versão executável distribuída, sob licença, aos usuários finais.

Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos para Aquecimento de Tanques de Criação de Camarões

Universidade Federal de Rio Grande
Centro de Ciências Computacionais - Instituto de Oceanografia
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Computação

Características do tanque

Volume do tanque:	30000	l
Calor específico da água:	4500	J/(kg.K)
Temperatura inicial:	20	°C
Potência do resistor:	10000	W
Tensão da rede elétrica:	127	V

Dimensionamento

Módulos Fotovoltaicos:	69	unid. de 325W
Potência do Inversor >	29	kWp
DJ de Proteção Inversor CA >	228	A
DJ de Proteção Módulos CC >	9	A
Aproveitamento do Resistor	183	%
DJ de Proteção Resistor CA	79	A

Figura 44: Tela da *interface* disponibilizada ao usuário final com dimensionamento exemplo realizado pela mesma.

Fonte: Autor

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs o dimensionamento de um sistema fotovoltaico para suprir a demanda energética para manutenção da temperatura da água marinha dos tanques de criação de camarões da EMA apresentou resultado adequado ao proposto. O sistema fotovoltaico dimensionado foi um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede - SFVCR que apresenta vantagens específicas na aplicação nos tanques de criação de camarões. A principal vantagem refere-se ao pico da radiação solar ocorrer justamente no período em que o aquecimento da água acontece por métodos naturais, ou seja, não há necessidade de utilização de aquecimento artificial. Logo o sistema fotovoltaico dimensionado injeta energia na rede de distribuição da concessionária durante aproximadamente 8 meses no ano, utilizando-a nos 4 meses restantes amparado pelas resoluções emitidas pela ANEEL.

Ainda, foi projetada uma *interface* gráfica para auxiliar criadores de camarões em sistemas semelhantes assim como universidades e afins para obter o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para aquecimento da água de tanques. O dimensionamento é realizado com o fornecimento de alguns dados de entrada, tais como o volume do tanque, temperatura inicial, entre outras.

Acredita-se que a contribuição mais relevante deste trabalho é a possibilidade de produzir camarões em tanques durante os 12 meses do ano, ou seja, ampliando os ciclos de criação, utilizando um recurso natural e inesgotável como solução.

Outro aspecto muito importante na construção do trabalho foi a integração de áreas bem distintas, como a computação e a aquicultura fomentando a busca de informações durante todo o período de desenvolvimento do mesmo. Cabe salientar que o ambiente da EMA é extremamente propício à implementação de técnicas de monitoramento e controle de variáveis sendo um excelente laboratório ao ar livre para pesquisadores e criadores. Desse modo, espera-se que este projeto seja implementado e os resultados possam ser obtidos de acordo com o que foi apresentado.

Portanto, como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se o estudo de outras fontes de energia bem como sistemas de isolamento térmico, que possam contribuir com a manutenção da temperatura da água complementando-se em modos híbridos assim como os sistemas termossolares fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

- Afonso, C. (2012). *Termodinâmica para engenharia*, volume 14. FEUP Edições, 1^a edition.
- Aneel (2015). Resolução 482 de 17/04/2012 revisada pela resolução 687 de 24/11/2015. www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf. Acesso em 20/06/2017.
- Aneel (2017). Banco de informações de geração. <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em 03/07/2017.
- Arichi, F., Cherki, B., and Djemai, M. (2012). Discrete state estimation in hybrid photovoltaic systems. In *Environment Friendly Energies and Applications (EFEA), 2012 2nd International Symposium on*, pages 256–261. IEEE.
- Bandeira, F. d. P. M. (2012). O aproveitamento da energia solar no brasil - situação e perspectivas. http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/9008/aproveitamento_energia_bandeira.pdf. Acesso em 22/07/2017.
- Barbosa, V. M. (2013). Análise comparativa da produção do camarão *Litopenaeus Vannamei* durante um ou dois ciclos intensivos em sistema BFT em viveiros no extremo sul do Brasil. *Universidade Federal de Rio Grande - FURG*.
- Bezerra, M. S. (2010). Projeto, implementação e ensaios de um controlador pid utilizando fpga. *Universidade Federal do Ceará - Centro de Tecnologia*.
- Bojorge, N. (2013). Transparência da disciplina de controle de processos. *Universidade Federal Fluminense - Departamento de Engenharia Química e de Petróleo*.
- Brabo, M. F., Pereira, L. F. S., Santana, J. V. M., Campelo, D. A. V., and Veras, G. C. (2016). Cenário atual da produção de pescados no mundo, no brasil e no estado do pará: ênfase na aquicultura. *Acta of Fisheries and Aquatic Resources.*, 4(2):50–58.
- Bueno, E., Martins, F., Gonçalves, A., Costa, R., de Lima, F., Rüther, R., de Abreu, S., Tiepolo, G., Pereira, S., and de Souza, J. (2017). Atlas brasileiro de energia solar. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE*.

- Burford, M., Thompson, P., Bauman, R., and Pearson, D. (2003). Nutrient and microbial dynamics in high intensive, zero-exchange shrimp ponds in Belize. *Aquaculture*, 219:393–411.
- Cohen, J., Samocha, T., Fox, J., Gandy, R., and Lawrence, A. (2005). Characterization of water quality factors during intensive raceway production of juvenile *Litopenaus vannamei* using limited discharge and biosecure management tools. *Aquacultural Engineering*, 32:425–442.
- Costa, C. M. (2013). Cultivo do camarão branco *Litopenaeus Vannamei* em sistema de bioflocos em viveiros com diferentes densidades de estocagem e utilização de água de subsolo. *Universidade Federal de Rio Grande - FURG*.
- Delgado, P., Avnimelech, Y., Mcneil, R., Bratvold, D., Browdy, C., and Sandifer, P. (2003). Physical, chemical and biological characteristics of distinctive regions in paddle wheel aerated shrimp ponds. *Aquaculture*, 217(1-4):235–248.
- Energia, P. (2015). Portal energia - energias renováveis. <https://www.portal-energia.com/controlador-carga-sistema-solar/>. Acesso em 15/08/2017.
- Energéticos, T. (2017). Trilhos energéticos soluções sustentáveis. <http://trilhosenergeticos.pt/energia-solar-termica/sistema-solar-termico-termossifao/>. Acesso em 04/09/2017.
- FAO (2016). The state of world fisheries and aquaculture - contributing to food security and nutrition for all. *Food and Agriculture Organizations of the United Nations*, page 200.
- Foes, G., Gaona, C., Poersh, L., Krummenauer, D., and Wasielesky, W. (2011). The effect of solids removal on water quality, growth and survival of *Litopenaus vannamei* in a biofloc technology culture system. *Aquaculture*, 11.
- Gondim, G. V. (2017). Potencial de geração de energia a partir dos resíduos sólidos orgânicos e efluentes líquidos gerados em uma unidade agroindustrial. *Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica*.
- Hostins, B. L. (2013). Cultivo do camarão rosa *Farfantepenaeus brasiliensis* em sistema de bioflocos em diferentes temperaturas: berçário e crescimento compensatório. *Universidade Federal de Rio Grande - FURG*.
- Krummenauer, D. (2012). *Otimização do manejo para o cultivo do camarão branco Litopenaeus Vannamei em sistemas de estufas com Bioflocos*. PhD thesis, Universidade Federal de Rio Grande - FURG.

- Mishra, J., Samocha, T., Patnaik, S., Speed, M., Gandy, R., and All, A. (2008). Performance of an intensive nursery system for the pacific white shrimp, *Litopenaus vannamei*, under limited discharge condition. *Aquacultural Engineering*, 38:2–15.
- Morgera, A. F. and Lughì, V. (2015). Frontiers of photovoltaic technology: A review. *Department of Engineering and Architecture, University of Trieste, Italy*.
- Moss, K. and Moss, S. (2004). Effects of artificial substrate and stocking density on the nursery production of pacific white shrimp *Litopenaus vannamei*. *Aquac. Soc.*, 35:536–542.
- NBR 12771, A. (1999). Nbr 12771 - termopares - tabela de referência. *Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT*.
- NBR 13773, A. (2008). Nbr 13773 - termorresistência industrial de platina - requisitos e ensaios. *Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT*.
- Niu, C., Lee, D., Goshima, S., and Nakao., S. (2003). Effects of temperature on food consumption, growth and oxygen consumption of freshwater prawn macrobrachium rosenbergii (de man 1979) postlarvae. *Aquaculture Research*, 34:501–506.
- Ogata, K. (2011). *Engenharia de controle moderno*, volume 1. Pearson Prentice Hall, 5^a edition.
- Oliveira, G. G. (2017). Avaliação do potencial de instalação de um sistema fotovoltaico para uma empresa do ramo de transportes de porto alegre. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS*.
- Oliveira Costa, L. (2009). Policultivo de camarão *Litopenaeus Vannameie* tainha *Mugil platanus* em viveiros. *Universidade Federal de Rio Grande - FURG*.
- Pereira, L. A. S. P. S. (2017). Estudo, modelagem e caracterização de processos de biodigestão com monitoramento e controle da temperatura. *Universidade Estadual Paulista - UNESP*.
- Pires, L. P., Freitas, L., Coelho, E., Farias, V., Freitas, L., Lima, G., and Rodrigues, D. (2014). Projeto e simulação computacional de um sistema fotovoltaico híbrido utilizado para injeção de potência ativa da rede elétrica e sistema ups aplicado à semáforos. *Universidade Federal do Triângulo Mineiro*.
- Poersch, L., Cavalli, R., Wasielesky, J., Castello, J., and Peixoto, S. (2006). Perspectivas para o desenvolvimento dos cultivos de camarões marinhos no estuário da lagoa dos patos, rs. *Ciência Rural*, pages 1337–1343.

- Raimo, P. A. (2007). *Aquecimento de água no setor residencial*. PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- Rampinelli, G. A. (2010). *Estudo de características elétricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.
- Rosa, A. and Gasparin, F. (2017). Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 7(2):140–147.
- Santiago, G. L. S. (2017). Microgeração solar fotovoltaica conectada à rede: análise da qualidade da energia. *Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFRSA*.
- Santos, R. R. d. (2010). Estudo de viabilidade técnica e econômica da instalação de um sistema de aquecimento de água utilizando energia solar. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS*.
- Saraiva, F. (2011). Métodos de sintonia em controladores pid. *Centro Universitário La Salle - Unilassale*.
- Serrano, R. O. P., do Vale Mereira, J. G., de Castro, A. L. P., Mesquita, A. A., and Martinez, C. B. (2017). Integração de sistemas fotovoltaicos e aquecedores de água solar em telhados residenciais. *Nativa*, 5(3):182–188.
- Silva, R. e. M. C. (2017). Energia solar fotovoltaica: Uma proposta para melhoria da gestão energética. *Inter Science Place*, pages 130–173.
- Van Wyk, P. and Scarpa, J. (1999). Water quality and management. farming marine shrimp in recirculating freshwater systems. *Florida Department of Agriculture and Consumer Services, Tallahassee*, pages 128–138.
- Varella, F. K. d. O. M. (2009). *Estimativa do índice de nacionalização dos sistemas fotovoltaicos no Brasil*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- Vargas, A., Angelico, B., and Scalassara, P. (2013). Transparência da disciplina de princípios de controle. *Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR*.
- Vinatea, L., Galvez, A., Browdy, C., Stokes, A., Venero, J., Haveman, J., Lewis, B., Lawson, A., Shuler, A., and Leffler, J. (2010). Photosynthesis, water respiration and growth performance of *Litopenaus vannamei* in asuperintensive raceway culture with zero water exchange: Interaction quality variables. *Aquacultural Engineering*, 42:17–24.
- Wasielesky, W. (2000). *Cultivo de juvenis do camarão-rosa Farfantepenaeus paulensis Decapoda, Penaeidae no estuário da Lagoa dos Patos: Efeitos dos parâmetros ambientais*. PhD thesis, Universidade Federal de Rio Grande - FURG.

Wasielesky, W., Atwood, H., Stokes, A., and Browdy, C. L. (2006). Effect of natural production in a zero exchange suspended microbial floc based super-intensive culture system for white shrimp *litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 258(1):396–403.

Zemor, J. C. (2014). Utilização de diferentes sistemas de aeração em viveiros na fase de engorda do camarão branco *Litopenaeus Vannamei* em cultivo intensivo com bioflocos. *Universidade Federal de Rio Grande - FURG*.

Zumarán, D. (2000). Avaliação econômica da geração de energia elétrica fotovoltaica conectada à rede em mercados desregulados. *USP - Curso de Energia - Departamento de Energia*.