



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE
PERNAMBUCO**
ENGENHARIA AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
Mestrado em Engenharia Ambiental.

Jurandy Moura de Moraes.

Dissertação

**Uma Alternativa à Escassez Hídrica.
Produção Sustentável de Água da Atmosfera, Através
do Dimensionamento Energético e Controle na
Formação do Orvalho.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Alex Souza Moraes.
Coorientador: Prof. Dr. Romildo Morant Holanda.

Recife
2023

Banca Examinadora.

Prof. Dr. Romildo Morant Holanda.
Coorientador

Prof. Dr. Alex Souza Moraes.
Orientador

Prof. Dr. Enjôlras de Albuquerque Medeiros Lima
Examinador Externo.

Prof. Dr. Otávio Pereira dos Santos Júnior
Examinador Externo.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M828a Moraes, Jurandy Moura de Moraes
 Uma Alternativa à Escassez Hídrica. Produção Sustentável de Água da Atmosfera, Através do Dimensionamento Energético e Controle na Formação do Orvalho. / Jurandy Moura de Moraes Moraes. - 2023.
 70 f.

 Orientador: Alex Souza. .
 Coorientador: Romildo Morant Holanda.
 Inclui referências.

 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, 2023.

 1. Temperatura de orvalho umidade do ar.. 2. produção de água. 3. atmosfera. 4. vapor d'água. 5. umidade do ar.
 I. , Alex Souza., orient. II. Holanda, Romildo Morant, coorient. III. Título

CDD 620.8

Agradecimentos.

Agradeço a Deus pela permissão em realizar este projeto, aos meus pais, *in memoriam*, Jurandy S. Moraes e Maria Dulce M. Moraes que promoveram minha educação e formação, à minha família, esposa Andréa C. M. de Moraes, filhos Jurandy S. M. Neto, Camilla M. Lavertu, André C. M. de Moares, genro Brian Lavertu, nora Camila Oliveira, e netos Luke Lavertu e Theo Moraes com o apoio e incentivos. Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Alex Souza Moraes e coorientador Prof. Dr. Romildo Morant Holanda, aos meus professores pelos ensinamentos, aos meus colegas de turma e à Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Não poderia esquecer os alunos Anthony Cavalcanti e Isaias Roberto, Jonathan Gonsalves e o profissional Ramon Brito que fizeram parte do desenvolvimento do sistema e do protótipo.

Muito obrigado.

Sumário

Lista de Figuras	4
Lista de Tabelas.	6
Lista de Equações.	7
Lista de Abreviaturas e Siglas.	8
Resumo	9
Abstract.....	10
1. – Introdução.....	11
2. – Objetivos.....	15
2.2. – Objetivos Específicos.	15
3. – Fundamentação Teórica.....	15
3.2. – Umidade relativa.....	17
3.3. – Temperatura de Orvalho.....	17
3.4. – Umidade Absoluta	18
3.5. – Densidade do Ar Atmosférico.	19
3.6. – Calor Específico e Calor Latente	20
3.7. – Energia para Orvalhar.....	21
4. – Metodologia.....	22
5 – Resultados.....	42
6 – Conclusões e Comentários.....	61
7 - Referências.	67

Lista de Figuras

Figura 1: Ciclo Hidrológico.....	11
Figura 2: Representação gráfica da água na Terra.	12
Figura 3 : Densidade do ar e pressão atmosférica em função da altitude.	20
Figura 4: Freezer horizontal 100 litros com serpentina aparente na parte interna.	23
Figura 5: Montagem da caixa de isopor.	23
Figura 6: Disposição do protótipo.	24
Figura 7: Freezer montado com exaustor e saída do ar de circulação.	24
Figura 8: Localização.	24
Figura 9: Desenho corte esquemático do fluxo de ar no interior do freezer.....	25
Figura 10: Arquitetura do sistema de medição e registro dos dados meteorológicos.....	26
Figura 11: Montagem do sistema de medição e registro dos dados meteorológicos.....	26
Figura 12: – Disposição dos sensores de temperatura e umidade do ar.	27
Figura 13: Comportamento da temperatura de orvalho em função da temperatura do ar e umidade relativa.	29
Figura 14: Sistema e algoritmo carregado.....	30
Figura 15: Produção de Água do Orvalho.	31
Figura 16: Comportamento da umidade Absoluta em função da temperatura e umidade relativa do ar...	33
Figura 17: Variação da densidade do ar em função da altitude.	34
Figura 18: Instalação do relés programáveis e medidor de consumo de energia.	38
Figura 19: Sensor de temperatura, medição do ar passando na serpentina.	39
Figura 20: Teste no protótipo. Liga/Desliga. Comportamento das variáveis no processo de automação.	40
Figura 21: Controlador de carga da bateria, carregador e inversor para circuito de alimentação do protótipo.	41
Figura 22: Banco de bateria.....	41
Figura 23: Paineis solares de alimentação do protótipo.	42
Figura 24: Mapa de Pernambuco com média anual dos registros horários (Whl ⁻¹) de energia requerida para orvalhar.....	43
Figura 25: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl ⁻¹) em Arcoverde.	45
Figura 26: Perfil de energia requerida (Whl ⁻¹) agrupado por horário em Arcoverde.	45
Figura 27: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl ⁻¹) em Caruaru.	46
Figura 28: Perfil de energia requerida (Whl ⁻¹) agrupado por horário em Caruaru.	46
Figura 29: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl ⁻¹) em Floresta.	47
Figura 30: Perfil de energia requerida (Whl ⁻¹) agrupado por horário em Floresta.	47
Figura 31: - Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl ⁻¹) em Garanhuns.....	48
Figura 32: Perfil de energia requerida (Whl ⁻¹) agrupado por horário em Garanhuns.....	48
Figura 33: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl ⁻¹) em Ibimirim.....	49
Figura 34: Perfil de energia requerida (Whl ⁻¹) agrupado por horário em Ibimirim.....	49
Figura 35: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl ⁻¹) em Ouricuri.....	50
Figura 36: Perfil de energia requerida (Whl ⁻¹) agrupado por horário em Ouricuri.	50
Figura 37: - Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl ⁻¹) em Palmares.	51
Figura 38: Perfil de energia requerida (Whl ⁻¹) agrupado por horário em Palmares.	51
Figura 39: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl ⁻¹) em Petrolina.....	52

Figura 40: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Petrolina.....	52
Figura 41: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Serra Talhada.....	53
Figura 42: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Serra Talhada.....	53
Figura 43: : Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário Salgueiro (registros reduzidos na estação A370 ano 2020) durante 2900 horas.....	54
Figura 44: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Salgueiro.....	54
Figura 45: - Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Surubim.	55
Figura 46: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Surubim.	55
Figura 47: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Recife.....	56
Figura 48: - Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Recife.	56
Figura 49: Comparativo entre municípios. Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}).	57
Figura 50: Dados de pH registrados através das amostras da água de orvalho produzida no protótipo....	60
Figura 51: Dados de condutividade elétrica registrados através das amostras da água de orvalho produzida no protótipo.	61
Figura 52: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Arcoverde.	64
Figura 53: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário do dia identificando os horários de menor e maior energia requerida em Arcoverde.	64

Lista de Tabelas.

Tabela 1: Distribuição da água na Terra.....	12
Tabela 2: Período de renovação da água em diferentes reservatórios na Terra.	13
Tabela 3: Demanda de energia média para a condensação para os estados brasileiros entre 23 horase 06 horas entre maio de 2017 a maio de 2018.....	21
Tabela 4: Comparativa entre temperatura de orvalho do INMET e temperatura do orvalho calculada pelo algoritmo	28
Tabela 5: Dados registrados pelo algoritmo desenvolvido na pesquisa.....	30
Tabela 6: Variação da densidade do ar em função da altitude.....	35
Tabela 7: Cálculo da energia requerida por litro de água do orvalho.	35
Tabela 8: Registros das estações meteorológicas nos 12 municípios escolhidos para a pesquisa.	37
Tabela 9: Valores de energia requerida média anual dos registros horários por litro de água produzido.	43
Tabela 10: – Dados registrados pelo sistema desenvolvido na pesquisa e cálculo da energia requerida em tempo real.	58

Lista de Equações.

Equação 1 – Pressão de vapor saturado na atmosfera	16
Equação 2 – Pressão do vapor de água.....	17
Equação 3 – Umidade Relativa do Ar	17
Equação 4 – Temperatura de Orvalho Tetens.....	18
Equação 5 – Temperatura de orvalho (Lawrence, 2015).....	18
Equação 6 – Umidade Absoluta do Ar	18
Equação 7 – Umidade Absoluta em função da Umidade Relativa.....	19
Equação 8 – Densidade do Ar em Função da Altitude	20
Equação 9 – Volume de Água Condensada.....	32

Lista de Abreviaturas e Siglas.

Q – Vazão de ar
EPA – Environmental Protection Agency
OI – Osmose inversa
OMS – Organização Mundial da Saúde
MDR – Ministério do Desenvolvimento Regional.
MIT – Massachusetts Institute of Technology
MMQ – Método dos Mínimos Quadrados
UNICEF – *United Nations International Children's Emergency Fund.*
WHO – World Health Organization
UR – umidade relativa do ar
Ppv – pressão parcial de vapor de água.
Pvs – pressão de vapor saturado de água no ar
A – constante de Tetens para cálculo da temperatura de orvalho.
B – constante de Tetens para cálculo da temperatura de orvalho.
Td – temperatura de orvalho
T, t – temperatura do ar.
UA – umidade absoluta.
Pv – concentração de vapor
mv – massa de vapor
V – volume ocupado pela mistura ar seco e vapor, volume desejado de produção de água na unidade de tempo
g – grama
m – metro
e – Base e do logaritmo Neperiano
p – pressão atmosférica
kg – quilogramakm – quilômetro
MMQ – método dos mínimos quadrados
d – densidade do ar
h – altitude, hora
kJ – quilo Joule
°C – grau Celsius
kW – quilo Watt
W – Watt
ln – logaritmo Neperiano
Tar – temperatura do ar
To – temperatura de orvalho
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
Er – energia requerida
Ec – energia consumida.
Tev – temperatura do ar na saída do evaporador
Hi – hora início de operação
Hf – hora fim da operação
l – litro
ea - pressão de vapor do ar
es - pressão de vapor saturado

Resumo

A escassez de água apropriada para o consumo humano é o maior problema ambiental que a humanidade enfrentará em um futuro muito próximo. Um processo de produção em larga escala de água do orvalho pode se tornar uma alternativa para minimizar essa problemática, principalmente por ser um processo isento de geração de resíduos durante a produção.

O enorme desafio para construção deste processo sustentável é o conhecimento da temperatura de orvalho e o domínio da energia requerida. Este trabalho de pesquisa fornece dados para dimensionamento de equipamentos de produção de água do orvalho com baixo consumo de energia e dados para projetos com uso de energia fotovoltaica. A pesquisa foi desenvolvida com a construção de um equipamento protótipo operacional movido à energia fotovoltaica para resfriamento do ar até atingir a temperatura de orvalho e formar água no estado líquido, permitindo o profundo domínio das variáveis do processo e das variáveis meteorológicas que regem o fenômeno do orvalho.

Um dispositivo de inteligência artificial foi elaborado em linguagem de programação Python capaz de medir, registrar as variáveis meteorológicas e calcular a energia requerida para orvalhar em tempo real em qualquer localidade onde for instalado.

Como resultados são apresentados, o sistema de medição de energia requerida, uma sistemática de automação, além de análises de dados.

Palavras-chaves:

Temperatura de orvalho; energia fotovoltaica; produção de água; atmosfera; vapor d'água; umidade do ar.

Abstract

The scarcity of water suitable for human consumption is the biggest environmental problem that humanity will face in the very near future. A large-scale production process of dew water can become an alternative to minimize this problem, mainly because it is a process free of solid and liquid waste generation during production.

The enormous challenge for the construction of this sustainable process is the knowledge of the dew temperature and the domain of the required energy. This research work provides data for designing dewwater production equipment with low energy consumption and data for projects using photovoltaic energy.

The research was developed with the construction of an operational prototype equipment powered by photovoltaic energy to cool the air until it reaches the dew temperature and forms water in the liquid state, allowing a deep mastery of the process variables and the meteorological variables that govern the phenomenon of the dew.

An intelligent device was developed in Python programming language capable of measuring, recording meteorological variables and calculating the energy required to dew in real time in any location where it is installed.

As results, were presented the required energy measurement system, an automation system, and data analysis.

Keywords:

Dew temperature; photovoltaics energy; water production; atmosphere; water vapor; air humidity.

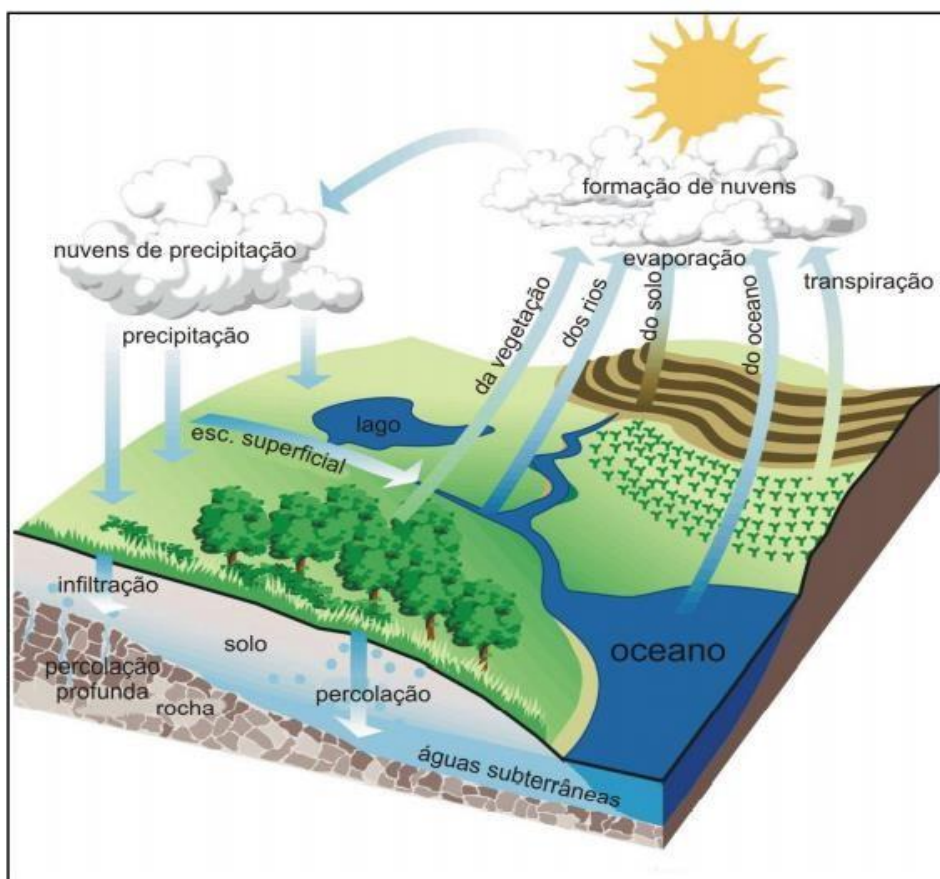
1.– Introdução.

A distribuição hídrica no planeta Terra, o uso inadequado da água em processos industriais, o consumo não sustentável e o aumento constante do efeito estufa tornam cada vez mais escasso o volume disponível de água para o consumo humano.

Estima-se que em 2025, mais da metade da população mundial deverá sofrer com falta de água em suas residências (Tavares; Araújo, 2016, *apud* Silva, 2018).

O ciclo hidrológico (Figura 1) permite a visualização e entendimento do caminho percorrido pela água no subsolo, superfície e atmosfera, através da ilustração do ciclo hidrológico e das diversas etapas que o compõem.

Figura 1: Ciclo Hidrológico



Fonte: Paz (2004).

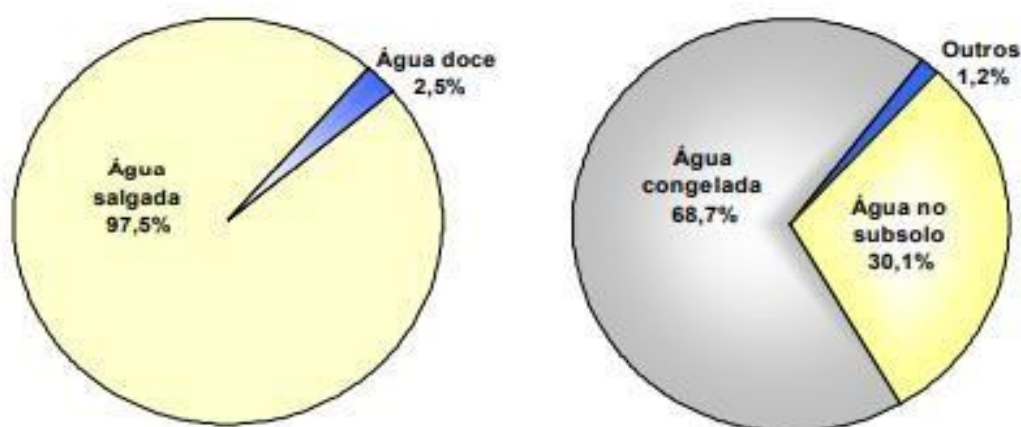
O quantitativo de ocorrência de água no planeta, permite localizar o universo onde este trabalho de pesquisa para produção de água está inserido no contexto hidrológico. A Tabela 1 e a Figura 2 mostra a distribuição de água no planeta.

Tabela 1: Distribuição da água na Terra

Reservatório	Volume (10 ³ km ³)	% Volume Total	% Volume Água Doce
Oceanos	1.338.000,0	96,5379	
Subsolo	23.400,0	1,6883	
Água Doce	10.530,0	0,7597	30,0606
Água Salgada	12.870,0	0,9286	
Umidade do Solo	16,5	0,0012	0,0471
Áreas Congeladas	24.064,1	1,7362	68,6973
Antártida	21.600,0	1,5585	61,6628
Groelândia	2.340,0	0,1688	6,6801
Ártico	83,5	0,0060	0,2384
Montanhas	40,6	0,0029	0,1159
Solos Congelados	300,0	0,0216	0,8564
Lagos	176,4	0,0127	
Água Doce	91,0	0,0066	0,2598
Água Salgada	85,4	0,0062	
Pântanos	11,5	0,0008	0,0328
Rios	2,1	0,0002	0,0060
Biomassa	1,1	0,0001	0,0031
Vapor d'água na Atmosfera	12,9	0,0009	0,0368
Armazenamento Total de Água Salgada	1.350.955,4	97,4726	
Armazenamento Total de Água doce	35.029,2	2,5274	100,0000
Armazenamento Total de Água	1.385.984,6	100,0000	

Fonte: Adaptado de Shiklomanov (2004).

Figura 2: Representação gráfica da água na Terra.



Fonte: Lima (2001).

Verifica-se que 97,5% do total de água no planeta é salgada e 2,5% é doce, neste

total de 2,5% , 0.0009% é de vapor d'água na atmosfera cerca de 12.900 Km³ de água que são renováveis através do ciclo hidrográfico. Embora o volume de vapor 12.900km³ possa aparentar ser pequeno quando relacionado aos demais, existe o fator de grande relevância que é a velocidade de renovação deste volume.

Segundo Shiklomanov (2004), a cada 8 dias cerca de 12.900 Km³ de vapor de água da atmosfera são renovados. Este é notadamente o ciclo hidrológico de maior velocidade na renovação de água pela natureza

Tabela 2: Período de renovação da água em diferentes reservatórios na Terra.

Reservatório	Período Médio de Renovação
Oceanos	2.500 anos
Água Subterrânea	1.400 anos
Umidade do Solo	1 ano
Áreas Permanentemente Congeladas	9.700 anos
Geleiras em Montanhas	1.600 anos
Solos Congelados	10.000 anos
Lagos	17 anos
Pântanos	5 anos
Rios	16 dias
Biomassa	algumas horas
Vapor D'água na Atmosfera	8 dias

Fonte: Adaptado de Shiklomanov (2004).

A questão do acesso à água doce é um problema que atinge mais de 700 milhões de habitantes do planeta; quase 50% estão na África Saariana (UNICEF & WHO, 2014, *apud* Grecco *et al.*, 2016). Globalmente, cerca de 88% das mortes por diarreia são atribuídas à má qualidade da água, saneamento inadequado e falta de higiene (UNICEF; OMS, 2009).

Por volta de 3 a cada 10 pessoas em todo mundo, ou seja 2,1 bilhões de pessoas, não têm acesso a água potável, e 6 a cada 10 pessoas, isto é, 4,4 bilhões de pessoas, não têm acesso a saneamento gerido de forma segura, de acordo com um relatório divulgado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) e o UNICEF, (2017).

A solução adotada em nível mundial para se obter água doce nas regiões áridas e semiáridas é a dessalinização da água do mar e da água salobra do subsolo através do

processo de osmose inversa.

Ao longo dos últimos 40 anos, os sistemas baseados em membranas de osmose inversa (OI) surgiram como uma solução eficaz para transformar águas salina, salobra ou contaminada utilizáveis para diversos fins, tanto industrial quanto de abastecimento humano (Coutinho, 2017).

A dessalinização é um processo físico-químico de separação soluto-solvente usado para reduzir a quantidade de sais dissolvidos em água do mar ou salobra para um nível adequado ao consumo humano, agricultura e pecuária. Tal processo tem sido estudado, há muitas décadas, como uma possível solução para o problema de escassez de água em algumas regiões do mundo (Greenlee *et al.*, 2009 *apud* Araújo, 2018).

Porém, este tipo de processo apresenta grande consumo de energia e enorme quantidade de geração de resíduo líquido, uma salmoura de concentração elevada. O mundo produz diariamente mais de 100 milhões de metros cúbicos de água dessalinizada gerando um volume equivalente de salmoura concentrada (Chandler, 2019).

50% do volume de água salgada que entra no processo de dessalinização por osmose inversa é descartado nos oceanos com o dobro da salinidade original, e descartado em lagoas nas regiões distantes dos oceanos que utilizam água salobra do subsolo

Segundo o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR, 2020), haverá investimento, por meio do Programa Água Doce, num total de R\$ 8,2 milhões na instalação de 170 sistemas e obras de dessalinização no semiárido pernambucano. A medida beneficiará mais de 68 mil pessoas de 21 municípios. São famílias que moram em áreas rurais e convivem com a escassez de água.

Há ainda a geração de resíduos sólidos com os descartes das membranas filtrantes saturadas pelo processo de dessalinização.

Segundo Remtavares (2015), a crescente evolução do mercado de dessalinização implica no aumento da utilização de recursos relacionados com a tecnologia de membranas, o que gera um aumento na geração de resíduos associados a esta tecnologia. Dependendo da qualidade da água a ser tratada, a vida útil das membranas de osmose reversa é de 5 a 8 anos. Portanto, há uma taxa significativa de substituição de membranas em todo o mundo. Geralmente, as membranas descartadas se acumulam em aterros sanitários, e estimava-se que até 2015 fossem atingidas 12.000 toneladas/ano

de módulos comerciais deteriorados.

Comparando o volume de dessalinização diário de 100 milhões de metros cúbicos ($0,1\text{Km}^3$) com o volume diário de renovação de água da atmosfera através do ciclo hidrográfico que é de $1612,5\text{ Km}^3$, conclui-se que seria totalmente possível, do ponto de vista volumétrico, substituir todo volume atual de água produzido pelo processo de dessalinização por um processo de condensação do vapor d'água da atmosfera sem geração de resíduos de salmoura super concentrada e sem resíduos de membrana de filtro. Logo a água do orvalho é uma solução sustentável e ambientalmente correta.

2.– Objetivos

2.1. – Ojetivo Geral

Elaborar projetos e dimensionar equipamentos de produção de água, em um processo isento de geração de resíduos e totalmente sustentável.

2.2. – Objetivos Específicos.

2.2.1. – Fornecer o perfil mensal e horário da energia requerida para produção sustentável de água do orvalho em municípios de Pernambuco. Apresentar o cálculo da energia requerida no ponto de orvalho, através da construção do dispositivo de medição em tempo real.

2.2.2. - Desenvolver uma inteligência artificial (automação) para que os projetos de produção de água de orvalho operem com maior eficiência energética.

3.– Fundamentação Teórica.

3.1. - Orvalho

O termo orvalho, temperatura do ponto de orvalho são citados inúmeras vezes nesta pesquisa, para melhor entendimento seguem algumas definições.

O orvalho é o resultado da transição de fase na qual o vapor d'água transforma-se em estado líquido ao entrar em contato com uma superfície (Agam ; Berliner, 2006, *apud* Corá, 2016).

A capacidade de retenção de vapor d'água pela atmosfera está relacionada com a temperatura do ar. Quanto maior for a temperatura do ar, maior será sua capacidade de reter vapor d'água. Quando a quantidade de vapor atinge o seu valor máximo para uma determinada temperatura, diz que o ar está saturado. A temperatura em que ocorre a saturação é denominada de temperatura do ponto de orvalho. A formação do orvalho ocorre quando as superfícies expostas ao ar livre se resfriam por efeito radiativo e atingem temperaturas abaixo da temperatura do ponto de orvalho (Silva, 2007).

A água contida no ar pode se tornar líquida num processo chamado condensação. Ela ocorre geralmente no caso de um esfriamento do ar, exemplos são a condensação sobre vidros, o orvalho que se forma de madrugada nas folhas de plantas e a própria formação de nuvens. Esses fenômenos ocorrem quando a pressão de vapor do ar (e_a) se torna superior à pressão de vapor saturado (e_s), que é função de sua temperatura. Quanto maior a temperatura, maior a sua pressão de vapor saturado, ou seja, mais água o ar pode conter. Uma fórmula empírica para se calcular e_s , é a equação de Tetens (Miranda *et al*, 2015).

$$e_s = A \cdot \exp^{\frac{17,3 \cdot t}{237,3+t}} \text{ ou } e_s = A \cdot 10^{\frac{7,5t}{237,3+t}} \quad (1)$$

O parâmetro A equivale a 610,8 Pa (para resultados em Pa), 0,6108 kPa (para resultados em kPa) ou 4,58 mmHg (para resultados em mmHg). A temperatura t , ao contrário da maioria das equações na física, é dada em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) (Miranda *et al*, 2015).

O ar, em condições atmosféricas normais, contém um certo teor de água. Pela Lei de Dalton existirá portanto uma pressão parcial desse vapor de água, a pressão de vapor recebe um símbolo próprio e_a . (Miranda *et al*, 2015).

$$e_a = P.f \quad (2)$$

e_a - pressão de vapor do ar (kgf.cm^{-2})

f - fração molar, razão entre a massa de água e massa total de ar

P – pressão atmosférica (kgf.cm^{-2})

3.2. – Umidade relativa.

A umidade relativa do ar é uma variável de extrema importância para o projeto da pesquisa, e aqui traremos a definição da umidade relativa que estará sendo utilizada no cálculo do ponto de orvalho e cálculo da energia requerida para formação do orvalho. Esta variável é encontrada na pesquisa através do sensor de umidade relativa do ar instalado no sistema de coleta e armazenamento de dados.

A umidade relativa do ar (UR) é por definição a razão entre a pressão parcial de vapor de água (P_{pv}) pela pressão de vapor saturado de água (P_{vs}) no ar em uma determinada condição de pressão e temperatura. Ou seja $UR = P_{pv} / P_{vs}$ (SILVEIRA, 2018).

$$UR = P_{pv} / P_{vs} \quad (3)$$

A umidade relativa do ar está relacionada com a quantidade de água existente no ar e a quantidade máxima que poderia haver na mesma temperatura. A maior temperatura aumenta a capacidade de retenção de água pelo ar e reduz a umidade relativa. (Malcorra, et. al., 2015)

3.3. – Temperatura de Orvalho.

A temperatura de orvalho, também conhecida como ponto de orvalho foi calculada com o desenvolvimento do algoritmo.

O registro mais antigo de medidas mais cuidadosas do ponto de orvalho encontrados, foi feito por Dalton em 1802, que estava interessado em compreender o processo da transformação de água em seu estado líquido em umidade do ar. Após certo tempo, August em 1828 propôs fórmula que depois veio a ser conhecida como “fórmula de Magnus”. Gibbins (1990), Strehlke, Alduchov e Eskridge (1996), também contribuíram para o avanço de toda a formulação. Entretanto, a atualização mais notável se deu por Tetens (1930), que sugeriu que $A=17,27$ e $B=237,3^\circ\text{C}$ (Lawrence, 2005 *apud* Grecco et. al, 2016).

A temperatura de ponto de orvalho pode ser dada por:

$$Td = B \cdot \alpha(T, UR) / A - \alpha(T, UR) \quad (4)$$

$$\alpha(T, UR) = (A \cdot T / (B + T)) + \ln(UR)$$

Onde,

A e B são constantes.

A=17.27 e B = 237.7 °C

Td – temperatura de orvalho

T – temperatura do ar

UR – umidade relativa.

α – função de T e UR

A fórmula empírica de temperatura de orvalho também foi encontrada no trabalho publicado por Mark G. Lawrence, como segue:

$$t_d = \frac{B_1 \left[\ln \left(\frac{RH}{100} \right) + \frac{A_1 t}{B_1 + t} \right]}{A_1 - \ln \left(\frac{RH}{100} \right) - \frac{A_1 t}{B_1 + t}}, \quad (5)$$

A₁ e B₁ São constantes.

A₁ = 17.625, B₁ = 243.04°C.

td – temperatura de orvalho em °C

t – temperatura do ar °C

RH – umidade relativa do ar.

3.4. – Umidade Absoluta

A umidade absoluta (UA) é definida como concentração de vapor (densidade de vapor de água em uma mistura) ou umidade absoluta. Para uma mistura de vapor de água e ar seco, a concentração de vapor p é definida como a razão entre a massa de vapor mv e o volume V ocupado pela mistura: $p_v = mv / V$ (WMO-No.8, 2008).

$$p_v = mv / V \quad (6)$$

A umidade absoluta (UA) é normalmente expressa em grama de vapor de água (g) por metro cúbico de ar (m³) e é calculada em função da umidade relativa (UR) e temperatura do ar (T) em graus célsius pela fórmula a seguir

$$UA = UR .1330 \frac{e^{\frac{17,62 T}{T+243,12}}}{(T+273,16)} \quad (7)$$

A teoria que suporta esta postagem, com a dedução da equação 7, está disponível em um artigo no Research Gate: Determinando a Umidade Absoluta do Ar a Partir da Umidade Relativa. (SILVEIRA, 2018).

3.5. – Densidade do Ar Atmosférico.

A densidade do ar não é fixa ao longo das camadas da atmosfera, ou seja, a densidade varia com a mudança de altitude, a medida que aumenta a altitude a densidade do ar diminui em uma relação definida e publicada em diversos trabalhos.

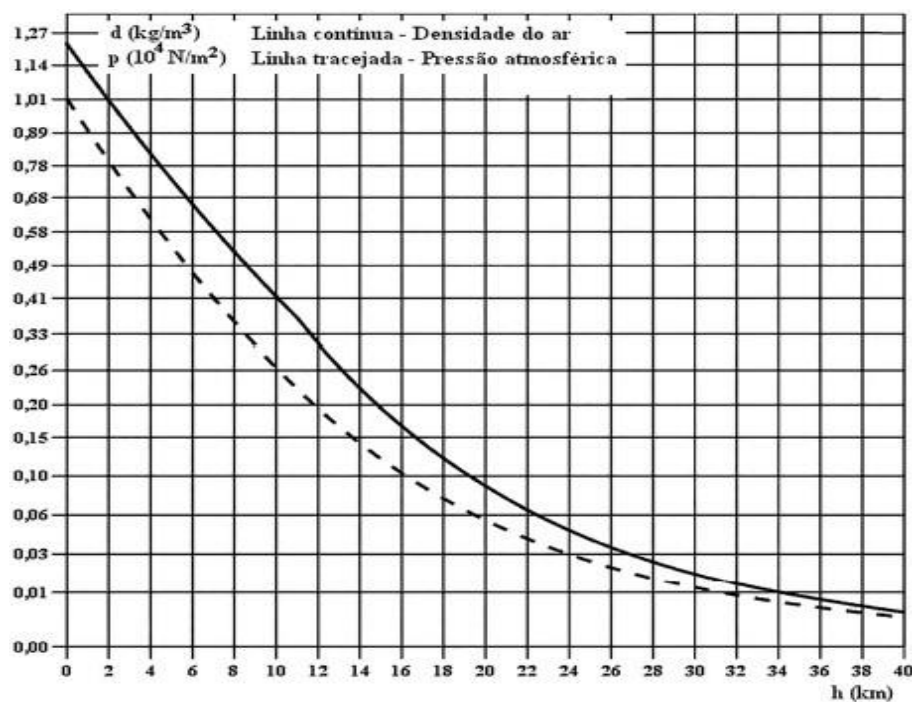
A pressão atmosférica diminui com o aumento da altitude em relação ao nível do mar. Essa diminuição era uma previsão de Pascal (1623-1662) a partir da sua hipótese do “oceano de ar”: assim como a pressão no interior de uma piscina diminui conforme se sobe dentro da água, assim também a pressão atmosférica deve diminuir ao aumentar a altitude. O célebre experimento na montanha de Puy de Dôme na França em 1647, onde um primo de Pascal realizou cuidadosas medidas da pressão atmosférica enquanto subia pela montanha, corroboraram a previsão e permitiram observar uma variação de cerca de 8 cm na coluna de mercúrio do barômetro ao passar do pé para o topo da montanha (a altura da montanha é de cerca 1,5 km). A diminuição da pressão atmosférica é concomitante com a diminuição da densidade do ar. Entretanto estas variações também dependem da temperatura do ar. Os estudos promovidos pela United States Air Force sobre a atmosferanos anos 70 culminaram na obra U.S. Standard Atmosphere 1976. 6 que fornece dados padrão sobre diversas variáveis. Foi a partir desses dados que o gráfico da Fig..1 foi construído. As expressões que seguem, obtidas por regressão (MMQ), reproduzem, com coeficiente de determinação superior a 0,99, as medidas de densidade d (em kg/m³) e

de pressão atmosférica p (em Pa) em função da altitude (h em km) a partir dos quais as curvas da Fig .1 foram construídas. (SILVEIRA, 2015)

$$d = 1,225e^{-h/8,882} \quad (8)$$

A Figura apresenta as curvas que relacionam a pressão atmosférica e a densidade do ar com a altitude.

Figura 3 : Densidade do ar e pressão atmosférica em função da altitude.



Fonte: Silveira, (2015).

3.6. – Calor Específico e Calor Latente

Os valores de calor específico e calor latente adotados neste trabalho estão representados abaixo:

Calor específico do ar seco – $1,0048 \text{ kJkg}^{-1}\text{°C}^{-1}$

Calor específico do vapor d'água contido no ar-
 $2,008 \text{ kJkg}^{-1}\text{°C}^{-1}$

Calor latente de vaporização – 2256 kJkg^{-1}

3.7. – Energia para Orvalho.

Silva (2018), em seu trabalho estuda a energia necessária para provocar o orvalho, e apresenta a energia média necessária na condensação para o estados brasileiros (Tabela 3). Observou-se que a menor demanda de energia foi encontrada no estado do Amapá. Já a maior demanda de energia foi observada no estado do Piauí. Dessa forma, o Amapá reafirma o seu potencial de captação de orvalho em relação a demanda de energia para a condensação do vapor de água. Isso sugere que os estados com maior umidade requerem menor energia para formação do orvalho.

Tabela 3: Demanda de energia média para a condensação para os estados brasileiros entre 23 horas e 06 horas entre maio de 2017 a maio de 2018.

Estado	Demanda de energia média (kWh/kg água)	
	Valor	Desvio padrão
Amazonas	0,650	0,010
Acre	0,654	0,009
Alagoas	0,656	0,013
Amapá	0,645	0,011
Bahia	0,691	0,043
Ceará	0,725	0,040
Distrito Federal	0,746	0,011
Espírito Santo	0,665	0,016
Goiás	0,747	0,037
Maranhão	0,701	0,038
Minas Gerais	0,711	0,040
Mato Grosso do Sul	0,705	0,025
Mato Grosso	0,679	0,028
Pará	0,673	0,019
Paraíba	0,689	0,038
Pernambuco	0,714	0,053
Piauí	0,752	0,035
Paraná	0,696	0,039
Rio de Janeiro	0,673	0,014
Rio Grande do Norte	0,706	0,029
Rondônia	0,666	0,020
Roraima	0,706	-
Rio Grande do Sul	0,699	0,023
Santa Catarina	0,686	0,035
Sergipe	0,665	0,034
São Paulo	0,698	0,037
Tocantins	0,700	0,041

Fonte: Silva, (2018).

Ainda, Silva (2007) publica o valor de energia requerida para se conseguir promover o fenômeno de orvalho.

Pesquisas realizadas nos municípios paraibanos de Campina Grande e São João do Cariri têm mostrado a viabilidade da produção de água potável a partir da formação do orvalho em superfícies refrigeradas por sistemas convencionais de refrigeração ou pelo uso de garrafas PET contendo gelo. Os resultados experimentais aqui apresentados mostram que o resfriamento do ar pode produzir quantidades suficientes de água para minimizar as consequências da escassez de água potável na região Semiárida do Nordeste brasileiro. O experimento baseado no contato direto do ar com a superfície fria do sistema de refrigeração produziu orvalho a uma taxa de 1,23 litros por hora por metro quadrado. Para se produzir um litro de orvalho, este sistema consome, em média, 0,75 kWh de energia elétrica. Os resultados obtidos são satisfatórios, considerando-se que o equipamento experimental utilizado é bastante simples (Silva, 2007)

4.– Metodologia.

4.1. Construção do Equipamento Protótipo, Sistema de medição de Temperatura e Umidade do Ar e Algoritmo para Cálculo da Temperatura de Orvalho Medido em Tempo Real.

Para conhecer as condições climáticas, conseguir reproduzir e dominar o fenômeno do orvalho e entender quais as variáveis que regem este fenômeno, foi construído um equipamento protótipo capaz de produzir o orvalho, criar situações adversas, acompanhar a performance de produção registrando as variáveis de impacto no processo. Através dele foi possível associar e correlacionar variáveis meteorológicas e variáveis de processo.

A construção do protótipo foi realizada com freezer horizontal de 100 litros, com compressor convencional de 120W de potência e serpentina exposta no lado interno do freezer (Figura 4). Uma caixa de isopor foi confeccionada para distribuição do ar internamente no freezer, conforme ilustrado na Figura 5.

O fluxo de ar no interior do freezer é acionado por um exaustor de 10W de potência na tampa superior, que puxa o ar do exterior para dentro do freezer . O ar é forçado a passar através da caixa de isopor e paredes refrigeradas pela serpentina do freezer, retornando pela saída na parte superior por um orifício de 40mm de diâmetro (Figura 7). O desenho

em corte esquemático figura 9 mostra o fluxo de ar passando por dentro do freezer.

A massa de ar ao entrar em contato com a serpentina em temperatura abaixo da temperatura de orvalho faz com que a umidade contida nesta massa condense provocando o orvalho.

O equipamento protótipo foi instalado no Porto Organizado de SUAPE, coordenadas(-8.387713, -34.953972), ilustradas na Figura 8.. Todos os experimentos foram realizados no mesmo local.

O custo de equipamentos e montagem neste etapa foi de R\$3.500,00

Figura 4: Freezer horizontal 100 litros com serpentina aparente na parte interna.



Fonte: Autor, (2023).

Figura 5: Montagem da caixa de isopor.



Fonte: Autor, (2023).

Figura 7: Freezer montado com exaustor e saída do ar de circulação.



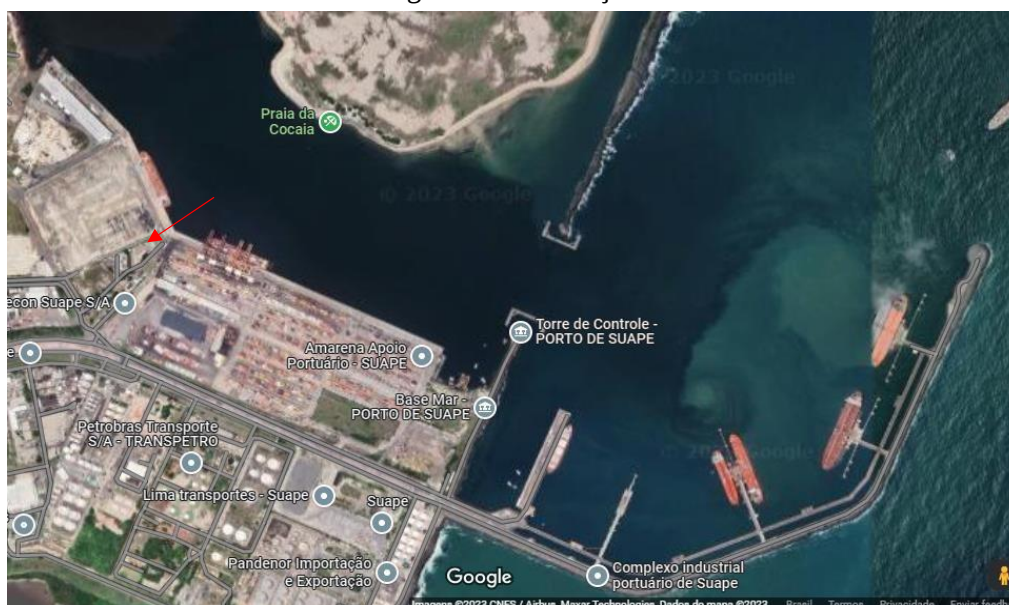
Fonte: Autor, (2021).

Figura 6: Disposição do protótipo.



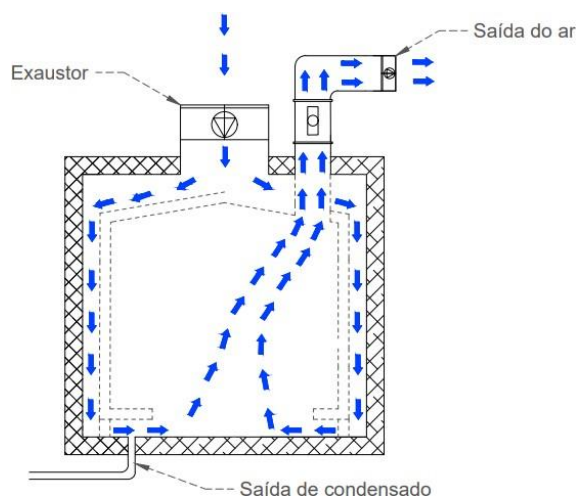
Fonte: Autor, (2021).

Figura 8: Localização.



Fonte: Autor, (2021).

Figura 9: Desenho corte esquemático do fluxo de ar no interior do freezer



Fonte: Autor (2021).

A água condensada é recolhida na parte inferior do freezer e mensurada em litros. Após cada experimento, com o protótipo em operação, foi medido o volume de condensado, a energia consumida, o fluxo de ar circulante no interior do freezer, a temperatura do ar, umidade relativa do ar e a temperatura de orvalho valor calculado.

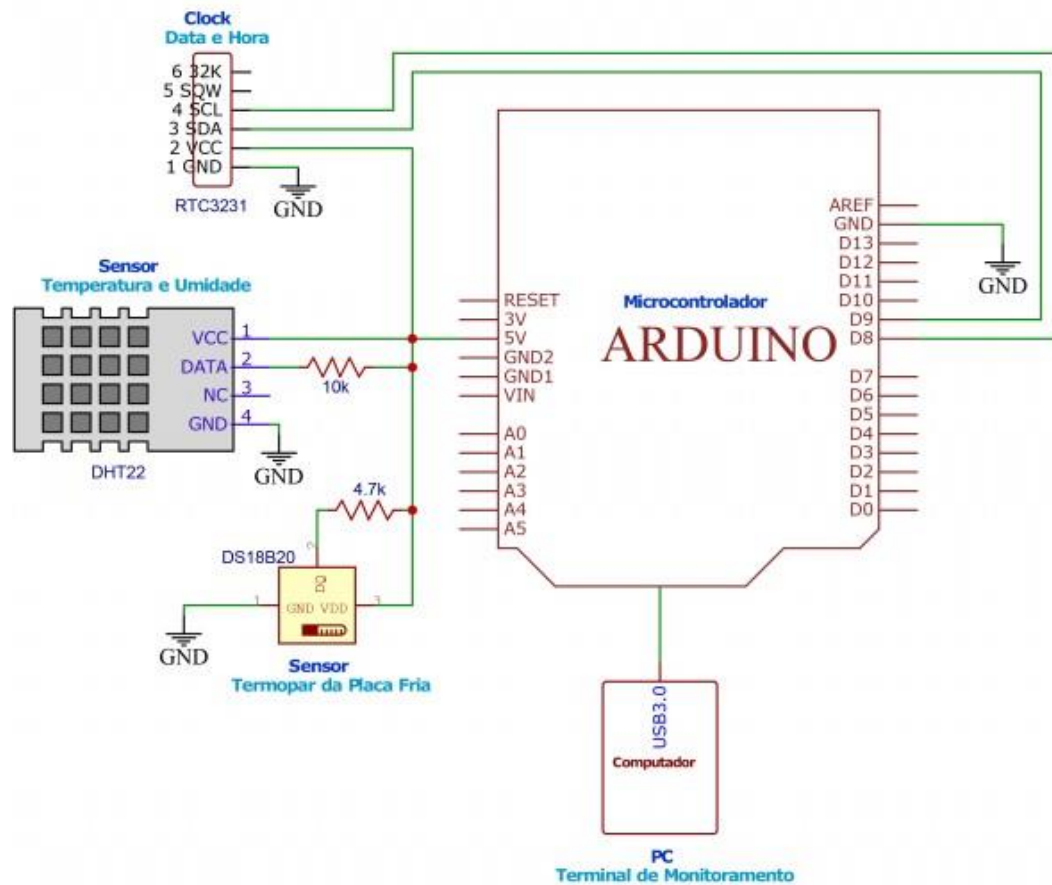
Com o protótipo em operação desde fevereiro de 2021 e com as experiências realizadas foi possível entender o processo de formação de orvalho.

Identificou-se que a vazão de ar (Q) é de fundamental importância no processo, no cálculo da energia requerida e na performance de produção. Quando variado o fluxo de ar para uma vazão, alta a serpentina não apresentou resfriamento até o ponto de orvalho, reduzindo desta forma a condensação. E no sentido inverso, quando muito reduzido este fluxo, a serpentina apresentou congelamento, inibindo a formação de orvalho.

Ainda com a operação desse protótipo, notou-se que a quantidade de água de orvalho (condensado) varia com as condições meteorológicas, varia com a umidade relativa, a temperatura do ar, temperatura da serpentina e o fluxo de ar que percorre o freezer. Para mensurar as variáveis meteorológicas durante os experimentos foi desenvolvido um sistema de medição e registro em linguagem de programação (algoritmo) Python. Os elementos de composição deste sistema foram: placa micro controladora arduino, sensor de temperatura e umidade relativa do ar, cálculo da temperatura de orvalho, clock e microcomputador para monitoramento, sensor de temperatura da serpentina e armazenamento dos dados. O custo de equipamentos e montagem e desenvolvimento do código de programação foi de R\$8.350,00

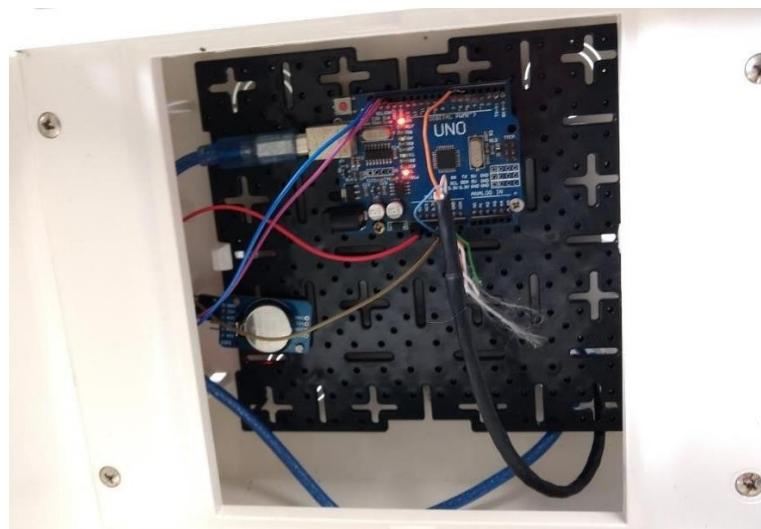
O esquema abaixo mostra a arquitetura do sistema na Figura 10, a montagem do sistema está representada pela Figura 11 e a disposição dos sensores de temperatura e umidade do ar, Figura 12.

Figura 10: Arquitetura do sistema de medição e registro dos dados meteorológicos.



Fonte: Autor (2021)

Figura 11: Montagem do sistema de medição e registro dos dados meteorológicos.



Fonte: Autor, (2021)

Figura 12: – Disposição dos sensores de temperatura e umidade do ar.



Fonte: Autor, (2021).

Os dados de temperatura de orvalho foram calculados utilizando a equação de Magnus- Tetens em função da temperatura do ar e umidade relativa, conforme registrado na equação 4 da fundamentação teórica, página 18.

$$T_o = B (\ln(UR/100) + A(Tar)/(B + Tar)) / (A - (\ln(UR/100) + A(Tar)/(B + Tar)))$$

Onde, $A = 17.27$ e $B = 237.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Tar – temperatura do ar

To – temperatura de orvalho

UR – umidade relativa do ar.

Houve a necessidade de comprovar que o cálculo da temperatura de orvalho, inserido no algoritmo desenvolvido nesta pesquisa, estava correto. Neste caso foi feito um comparativo entre os dados de temperatura de orvalho publicados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), estação A350, no ano de 2020 na cidade de Serra Talhada e o cálculo da temperatura de orvalho usando os mesmos dados do município.

Concluiu-se serem compatíveis, o cálculo através da fórmula de Maguns-Tetens inserido no algoritmo do sistema e o resultado de temperatura de orvalho do INMET.

O resultado encontrado para mais de 8000 registros foi satisfatório, a média entre a diferença da temperatura de orvalho do INMET e a temperatura de orvalho calculada pelo algoritmo é de 0,094 grau centígrado. A tabela 4.1.1 abaixo mostra os cálculos das diferenças. A coluna E se refere a temperatura de orvalho registrada pelo INMET e a coluna F representa o valor calculado da temperatura de orvalho através da fórmula de Magnus-Tetens utilizando os mesmos dados do INMET. A coluna G é o resultado da diferença entre as duas temperaturas de orvalho em valores absolutos dados em graus Celsius.

Tabela 4: Comparativa entre temperatura de orvalho do INMET e temperatura do orvalho calculada pelo algoritmo

SERRA TALHADA (A350)					Cálculo	Média da Diferença
Data	Hora (UTC)	Temp. Ins. (C)	Umi. Ins. (%)	Pto Orv. Ins. (C) INMET	Magnus	Dif. Maguns - Inmet
01/01/2020	100	22,2	82	18,9	19,01126	0,111258197
01/01/2020	200	22,9	81	19,5	19,49961	-0,000387123
01/01/2020	300	23,1	77	18,9	18,88869	-0,011312076
01/01/2020	400	21,8	83	18,7	18,81247	0,112465573
01/01/2020	500	20,7	85	18,1	18,11111	0,011108542
01/01/2020	600	20,5	84	17,6	17,72845	0,12844594
01/01/2020	700	21	77	16,9	16,8511	-0,048900182
01/01/2020	800	20,5	83	17,5	17,5401	0,040099749
01/01/2020	900	21,5	74	16,7	16,71406	0,01406499
01/01/2020	1000	21,9	74	17,1	17,10043	0,000432629
01/01/2020	1100	23,1	74	18,2	18,25942	0,059421237
01/01/2020	1200	25	57	15,9	15,97747	0,07746895
01/01/2020	1300	25,8	59	17	17,26689	0,266893868
01/01/2020	1400	28,1	48	16,1	16,1808	0,080803489
01/01/2020	1500	28,7	47	16,4	16,40312	0,003124083
01/01/2020	1600	29,2	44	15,7	15,83339	0,133390911
01/01/2020	1700	28,9	46	16,1	16,25104	0,151044694

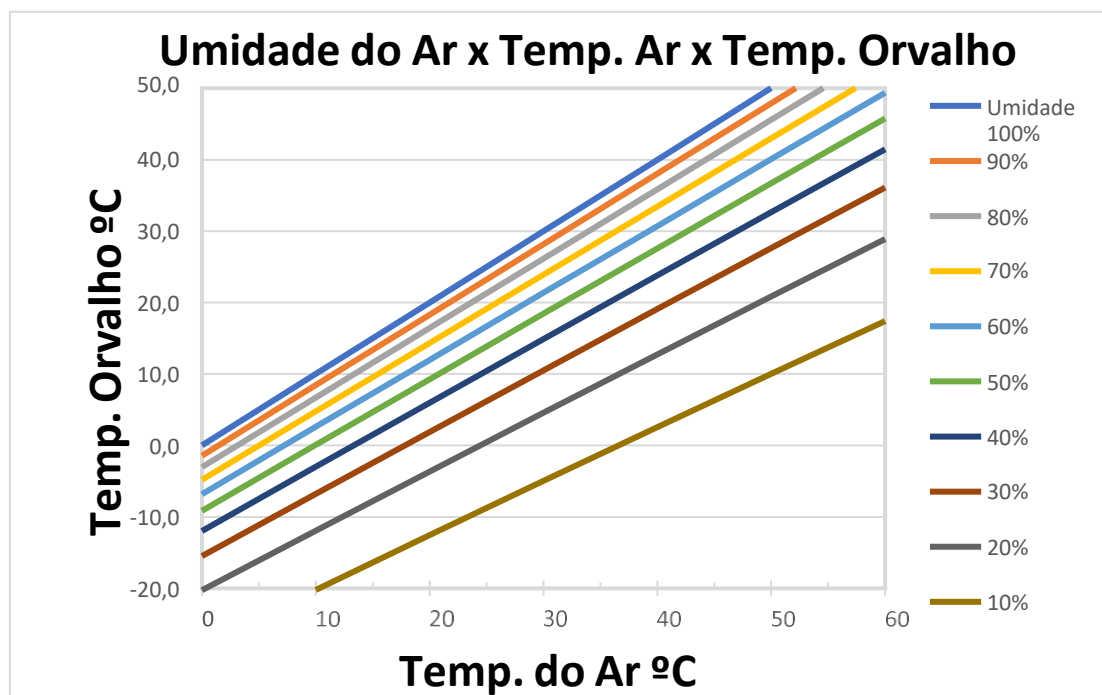
Fonte: Autor, (2021).

Foi validada a compatibilidade entre o cálculo de temperatura de orvalho através da fórmula de Maguns-Tetens inserida no algoritmo do sistema e o resultado de temperatura de orvalho do INMET.

Para melhor entendimento o comportamento da temperatura de orvalho de forma mais rápida sem a necessidade de recorrer a fórmula e cálculos, foi adaptado um gráfico

(Figura 13) que estabelece a temperatura de orvalho em função da temperatura e umidade relativa do ar. Este gráfico facilita a rápida compreensão e visualização da temperatura de orvalho e foi adaptado durante os experimentos para ajustar a temperatura da serpentina, temperatura do freezer e vazão de ar inserida no interior do equipamento. Nos intervalos entre as umidades do ar optamos por valores aproximados de temperaturas de orvalho.

Figura 13: Comportamento da temperatura de orvalho em função da temperatura do ar e umidade relativa.



Fonte: Adaptado de Leohbicalho (2013).

Nesta etapa da pesquisa foi concluído um programa de computador, um algoritmo capaz de medir na data e horários programados, as variáveis meteorológicas de umidade relativa do ar, temperatura do ar e, por fim, calcular a temperatura de orvalho em tempo real.

O sistema e algoritmo são portáteis (Figura 14) conectam-se em qualquer computador, podendo ser instalado em qualquer local para medição, registro de dados de temperatura e umidade relativa do ar e cálculo da energia requerida para o orvalho no local onde se deseja especificar, dimensionar e instalar equipamentos sustentáveis de produção de água do orvalho. Caso haja conexão de internet os dados poderão ser visualizados remotamente de qualquer local.

Figura 14: Sistema e algoritmo carregado.



Fonte: Autor, (2021).

A Tabela 5 mostra os dados em tempo real registrados pelo algoritmo desenvolvido na pesquisa. O sensor de temperatura e umidade do ar registra e transmite para o algoritmo desenvolvido onde é calculada a temperatura de orvalho.

Tabela 5: Dados registrados pelo algoritmo desenvolvido na pesquisa.

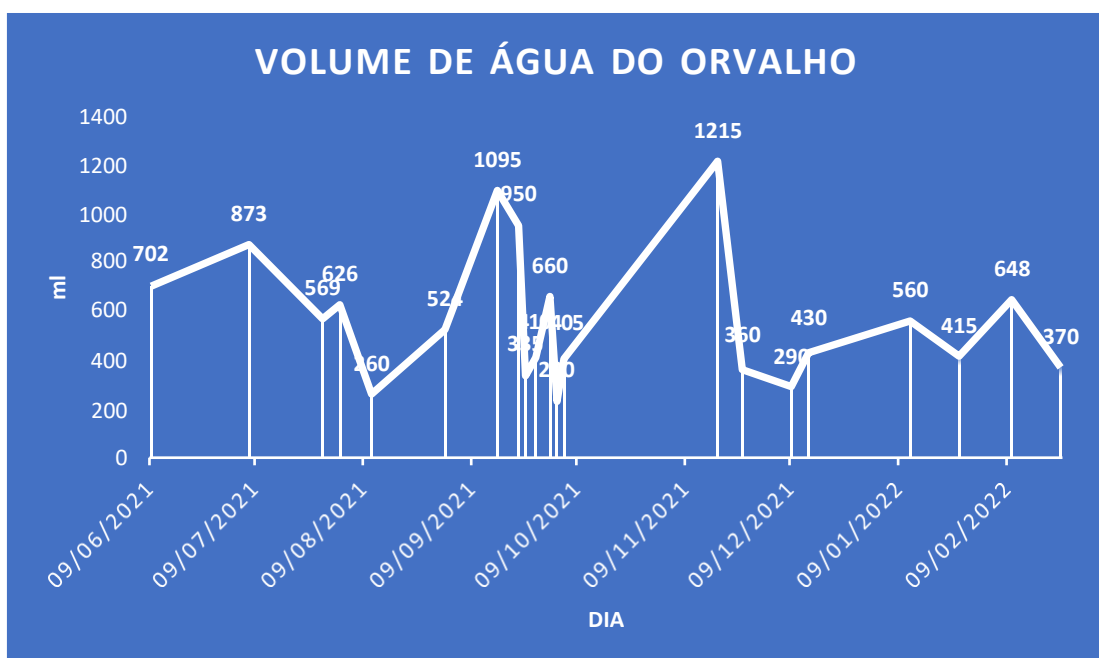
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Data	Hora	Umid.Ar °C	Temp.Ar °C	Temp.Orv.°C								
2	01/03/2021	14:29:26	85,5	25,7	23,1								
3	01/03/2021	15:29:25	80,1	26,8	23,1								
4	01/03/2021	16:29:25	86,7	26,7	24,3								
5	01/03/2021	17:29:24	88,7	25	23								
6	01/03/2021	18:29:23	85,8	26,1	23,6								
7	01/03/2021	19:29:22	85,7	26,1	23,5								
8	01/03/2021	20:29:21	83,1	26,3	23,2								
9	01/03/2021	21:29:20	83,7	25,8	22,8								
10	01/03/2021	22:29:19	85,6	26,4	23,8								
11	01/03/2021	23:29:18	89,2	25,2	23,3								
12	02/03/2021	00:29:17	92,7	24,3	23,1								
13	02/03/2021	01:29:17	93,9	23,9	22,9								
14	02/03/2021	02:29:16	94,6	23,6	22,7								
15	02/03/2021	03:29:15	94,3	23,5	22,5								
16	02/03/2021	04:29:14	95,1	23,2	22,4								
17	02/03/2021	05:29:13	95,7	23,1	22,4								
18	02/03/2021	06:29:12	94,7	23,4	22,5								
19	02/03/2021	07:29:11	91,5	25,2	23,7								
20	02/03/2021	10:25:30	79	30,8	26,7								
21	02/03/2021	11:25:29	65,4	34	26,6								
22	02/03/2021	12:25:28	63,2	34,7	26,7								

Fonte: Autor, (2021).

Somente com a construção do equipamento protótipo para produção de água do orvalho foi possível entender e dominar o fenômeno do orvalho, conhecer as variáveis envolvidas, desenvolver o processo de formação induzida de orvalho e gerar simulações que suportaram o desenvolvimento das etapas apresentadas a seguir.

Os registros de energia consumida e a vazão de orvalho produzido foram desprezados em virtude da baixa eficiência do equipamento protótipo, das diversas interrupções no processo produtivo motivado por chuvas durante os experimentos e dos ajustes necessários para operar com energia solar (baterias descarregadas pelo processo). Os resultados mais notáveis nesta metodologia estavam na coleta da água produzida para realização de análises de qualidade, gráfico figura 15, no acerto do desenvolvimento do processo produtivo e no cálculo da temperatura de orvalho em tempo real.

Figura 15: Produção de Água do Orvalho.



Fonte: Autor, (2021).

4.2.– Metodologia 2. Cálculo da Energia Requerida para Transformação do Vapor D'água da Atmosfera em Água no Estado Líquido

A determinação para a energia requerida à transformação da água no estado gasoso em água líquida, numa determinada massa de ar, está apresentada a seguir.

Para melhor entendimento e apresentação didática dividiu-se a composição desta energia em três partes, como seguem:

- Primeira parte: energia para resfriar uma massa de ar seco da temperatura ambiente até a temperatura de orvalho. Calor específico do ar seco à pressão constante $1,0048 \text{ kJkg}^{-1}\text{°C}^{-1}$
- Segunda parte: a energia requerida para resfriar a água contida (umidade absoluta) na massa de ar, da temperatura ambiente à temperatura de orvalho: Calor específico do vapor de água contida no ar $2,008 \text{ kJkg}^{-1}\text{°C}^{-1}$
- Terceira parte: refere-se à energia requerida para orvalhar, a energia de transformação da fase vapor, contida na massa de ar, para a fase líquida da água. Calor Latente de vaporização da água 2256 kJkg^{-1} .

Nesta etapa do trabalho foi definida a massa de ar e vapor de água contido nela, que deverá ser inserido no equipamento de produção de água do orvalho para se conseguir uma quantidade de água no estado líquido..

Aqui, esta variável é chamada de V (volume de água desejado por unidade de tempo), ou seja, alguém que deseja dimensionar um equipamento de produção de água do orvalho deve ter definida a quantidade de água desejada, por exemplo 100 litros de água por dia. A partir desta definição este valor será submetido às condições climáticas da região para se calcular o perfil da energia requerida.

O cálculo da vazão de ar necessária para se conseguir o desejado volume de água no estado líquido é definido pela equação 9, onde a variável representada pela letra Q é a vazão de ar inserido no equipamento, V o volume de água desejado e UA a umidade absoluta. Na etapa anterior viu-se essa vazão (Q) sendo acionada pelo exaustor. A umidade absoluta multiplicada pela vazão de ar inserido no equipamento será igual ao volume desejado de água.

$$V = UA.Q \quad (9)$$

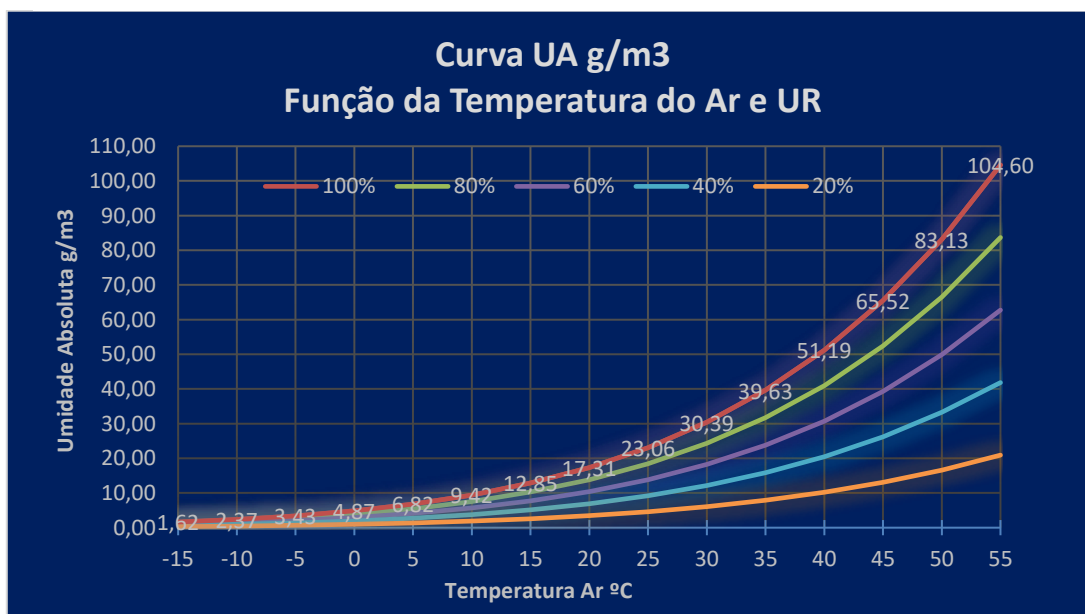
UA é a umidade absoluta e é normalmente expressa em gramas de vapor de água (g) por

metro cúbico de ar (m³), é calculada em função da umidade relativa (UR) e temperatura do ar (T) em graus celsius pela fórmula abaixo, como apresentado na fundamentação teórica, equação 7:

$$UA = UR \cdot 1330 \frac{e^{\frac{17,62 T}{T+243,12}}}{(T+273,16)}$$

Foi desenvolvido o gráfico representado na Figura para visualização e entendimento do comportamento da UA em relação a temperatura e umidade relativa do ar. Ou seja, a curva da umidade absoluta em relação a temperatura do ar, considerando a umidade relativa em 100%, 80%, 60%, 40% e 20%. Para o cálculo da umidade absoluta em função da umidade relativa com valores fora das curvas é necessário multiplicar o valor da umidade absoluta na curva de umidade relativa 100%, pelo valor da umidade relativa sem representação expressa nas curvas do gráfico. Para melhor compreensão segue o exemplo: o ar de um ambiente na temperatura de 25° C com umidade relativa de 65% apresenta uma umidade absoluta no gráfico de 23,06 g.m⁻³ para umidade relativa de 100%, logo a umidade absoluta nesta condição (25°C e 65%) será de 23,06 x 0,65 = 14,99 g.m⁻³, ou seja, um ambiente com temperatura do ar de 25° C e umidade relativa de 65% apresenta uma quantidade de vapor d'água de 14,99 gramas em 1 metro cúbico de ar. Conhecendo-se a umidade absoluta é possível a calcular a vazão de ar necessária para um volume de água (V) desejado.

Figura 16: Comportamento da umidade Absoluta em função da temperatura e umidade relativa do ar.



Fonte: Autor, (2021).

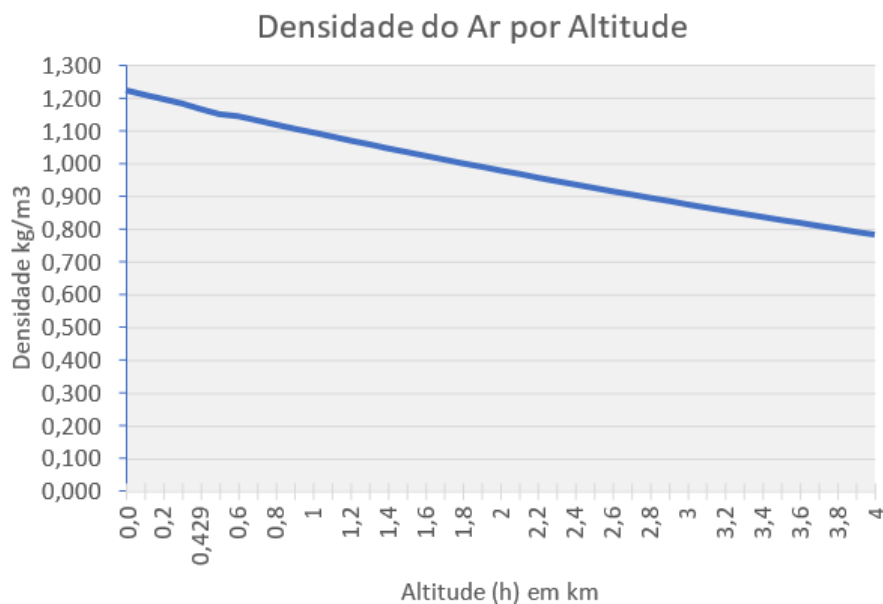
A vazão de ar a ser inserida no sistema/equipamento de produção de água do orvalho está definida, é variável em função das condições meteorológicas e tem fundamental importância no dimensionamento do equipamento.

De posse das variáveis vazão de ar (Q), temperatura do ar (T), temperatura de orvalho (To) e o volume de água desejado (V), verificou-se que a densidade do ar é variável em função da altitude, logo a massa de ar será corrigida pela altitude da localidade onde se deseja produzir água do orvalho. A densidade do ar é uma componente necessária para a transformação da vazão de ar, de metro cúbico por hora para quilograma força por hora.

Utilizando a equação 8 da fundamentação teórica foi possível a construção do gráfico representado na Figura 17 e da tabela 7 de densidade do ar em função da altitude (h) em quilômetros.

$$d = 1,225e^{-h/8,882}$$

Figura 17: Variação da densidade do ar em função da altitude.



Fonte: Autor, (2021).

Tabela 6: Variação da densidade do ar em função da altitude.

Altitude km	Densidade Ar kg/m ³	Altitude km	Densidade Ar kg/m ³	Altitude km	Densidade Ar kg/m ³	Altitude km	Densidade Ar kg/m ³
0,0	1,225	1	1,095	2	0,979	3	0,875
0,1	1,211	1,1	1,083	2,1	0,968	3,1	0,865
0,2	1,198	1,2	1,071	2,2	0,957	3,2	0,855
0,3	1,184	1,3	1,059	2,3	0,946	3,3	0,846
0,4	1,171	1,4	1,047	2,4	0,936	3,4	0,836
0,5	1,158	1,5	1,035	2,5	0,925	3,5	0,827
0,6	1,145	1,6	1,024	2,6	0,915	3,6	0,818
0,7	1,132	1,7	1,012	2,7	0,905	3,7	0,809
0,8	1,120	1,8	1,001	2,8	0,895	3,8	0,800
0,9	1,107	1,9	0,990	2,9	0,885	3,9	0,791

Fonte: Autor, (2021).

A Energia requerida (Er) por litros de água produzido foi então calculada como o somatório da energia retirada do ar seco, adicionado da energia retirada do vapor e da energiaretirada na condensação em tempo real (Tabela 7).

Tabela 7: Cálculo da energia requerida por litro de água do orvalho.

Arco Verde	Altitude 684m	Tar	UR	To	UA	Q = V/UA	Energia
Data	Hora	Temp. ar °C	Umi. Rel. (%)	Temp. orv °C	g água /m ³	m ³ ar/h	Wh/l
01/01/2020	0	21,1	88	18,9	16,24	51,10	670,07
01/01/2020	100	21	88	19	16,15	51,40	666,40
01/01/2020	200	21,2	89	19,4	16,52	50,24	661,68
01/01/2020	300	21	90	19,3	16,51	50,26	659,78
01/01/2020	400	21	91	19,4	16,70	49,71	657,52
01/01/2020	500	20,9	91	19,4	16,60	49,99	655,79
01/01/2020	600	21,2	91	19,6	16,89	49,13	657,17
01/01/2020	700	21,2	91	19,7	16,89	49,13	655,29
01/01/2020	800	20,9	92	19,6	16,78	49,45	651,70
01/01/2020	900	21,4	92	20	17,28	48,04	652,84
01/01/2020	1000	22,2	90	20,5	17,70	46,89	657,59
01/01/2020	1100	24,1	76	19,7	16,66	49,83	710,84
01/01/2020	1200	24,9	73	19,8	16,74	49,59	723,68
01/01/2020	1300	26,2	67	19,5	16,52	50,23	755,62
01/01/2020	1400	27,7	59	19	15,81	52,50	801,47
01/01/2020	1500	28,1	57	18,9	15,61	53,16	813,81
01/01/2020	1600	24,2	74	19,3	16,31	50,89	722,33
01/01/2020	1700	24,6	74	19,6	16,68	49,75	722,10
01/01/2020	1800	24,8	75	19,9	17,10	48,54	717,93
01/01/2020	1900	23,3	81	20	16,96	48,93	688,79
01/01/2020	2000	23,6	78	19,6	16,62	49,95	703,42
01/01/2020	2100	23,9	76	19,5	16,47	50,40	711,80
01/01/2020	2200	22,9	83	19,8	16,99	48,85	684,96
01/01/2020	2300	22,5	82	19,3	16,41	50,59	688,95

Fonte: Autor, (2021).

Mantendo-se fixo o volume deseja de produção de água do orvalho, a vazão de ar inserido no equipamento será variável em função da UA, que por sua vez é função da temperatura

do ar e umidade relativa como abordado anteriormente. Logo o equipamento de produção de água do orvalho deverá ter inteligência (automação) para ler as variáveis meteorológicas, variar a vazão de ar através da rotação do exaustor, calcular a energia requerida para as condições meteorológicas lidas e adequar a carga térmica para atingir e manter a temperatura de orvalho garantindo o volume desejado.

É preciso registrar com ênfase que a energia consumida (E_c) pelo equipamento/sistema de produção de água será sempre diferente da energia requerida (E_r) à formação do orvalho apresentada nesta pesquisa. A energia consumida vai depender da eficiência do equipamento de refrigeração, que por sua vez é função do tipo de equipamento, do fluido refrigerante e do fabricante.

A potência de refrigeração ou capacidade de refrigeração nominal, segundo a terminologia do INMETRO – ou de aquecimento em aparelhos em ciclo reverso – é de 2 a 4 vezes maior do que a potência elétrica consumida pelo aparelho (ou potência elétrica entrada no aparelho) (Silveira, 2018).

Não cabe aqui definir qual será a energia consumida pelo equipamento e sim a entrega do perfil requerido de energia para orvalhar nas condições meteorológicas encontradas.

Através da medição dos dados meteorológicos desenvolvido e com a formulação do cálculo da energia requerida, finalizou-se a construção do sistema de medição e registro da energia requerida para orvalhar em qualquer local onde se deseja instalar equipamentos de produção de água do orvalho.

Para o cálculo do perfil energético requerido em alguns municípios de Pernambuco foram utilizados os dados meteorológicos fornecidos através das estações meteorológicas do INMET no ano de 2020 e a metodologia desenvolvida nesta pesquisa. A Tabela 8 mostra os municípios, latitudes, longitudes, altitudes e suas respectivas estações referenciadas pelo código da estação Axxx.

Tabela 8: Registros das estações meteorológicas nos 12 municípios escolhidos para a pesquisa.

DC_NOME	SG_ESTADO	VL_LATITUDE	VL_LONGITUDE	VL_ALTITUDE	CD_ESTACAO
ARCO VERDE	PE	-8,4336111	-37,0555555	683,95	A309
CARUARU	PE	-8,3652777	-36,0283333	852	A341
FLORESTA	PE	-8,5988888	-38,5841666	327,42	A351
GARANHUNS	PE	-8,9108333	-36,4933333	827,78	A322
IBIMIRIM	PE	-8,5094444	-37,7116666	434,23	A349
OURICURI	PE	-7,8858333	-40,1027777	457,85	A366
PALMARES	PE	-8,6666666	-35,5680555	164,01	A357
PETROLINA	PE	-9,388323	-40,523262	372,72	A307
RECIFE	PE	-8,0591666	-34,9591666	11,3	A301
SALGUEIRO	PE	-8,0580555	-39,0961111	447	A370
SERRA TALHADA	PE	-7,954277	-38,295082	499,02	A350
SURUBIM	PE	-7,8397222	-35,8011111	421,44	A328

Fonte: INMET, (2021).

5. – Metodologia 3. Automação do Equipamento de Produção de Água do Orvalho em Função da Energia Requerida para Orvalhar.

Antes da dissertação desta metodologia é importante salientar que a referência ao equipamento de produção de água do orvalho é associada a um equipamento existente no mercado. A metodologia foi testada no equipamento protótipo e poderá ser aplicada em qualquer equipamento.

Durante a prática executada registrou-se a necessidade de desenvolvimento de um processo de automação com o objetivo de tornar sustentável, o equipamento e processo com propósito de geração de água do orvalho no volume projetado.

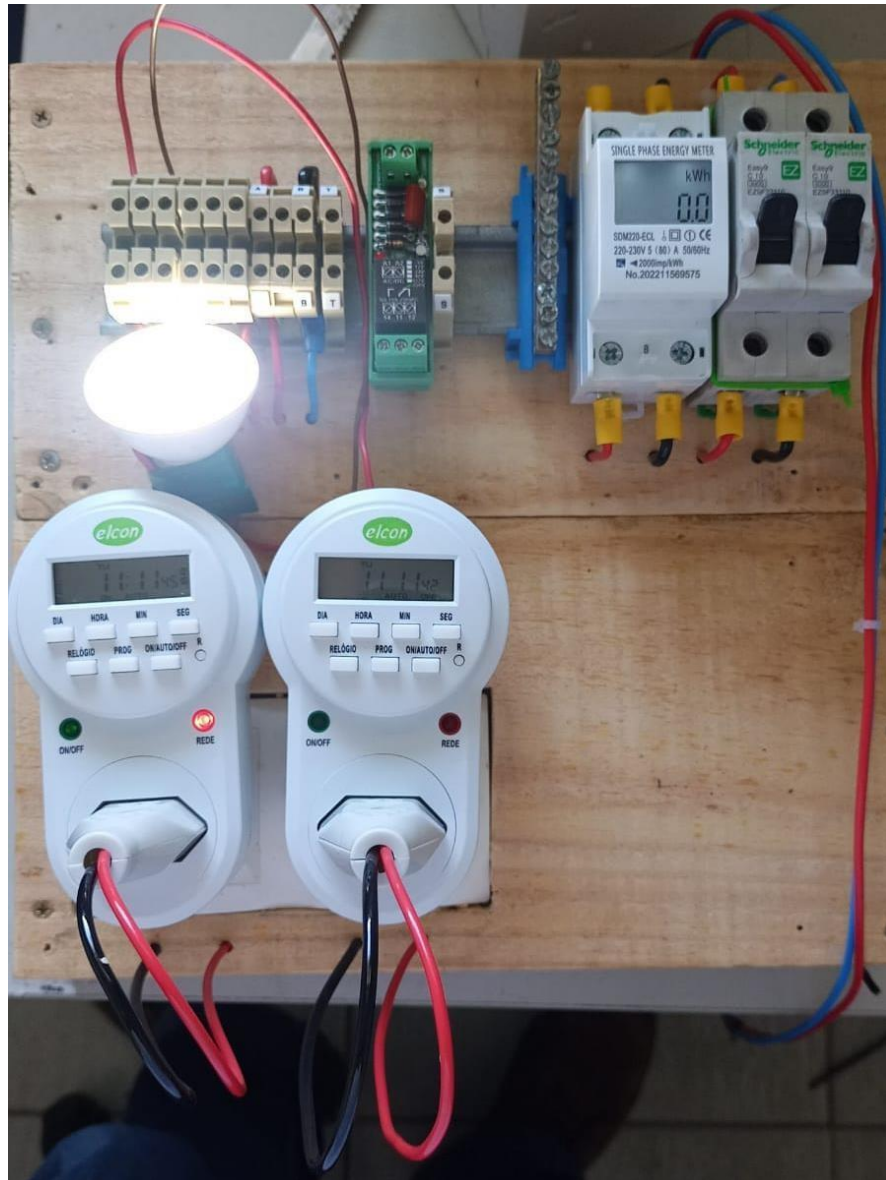
A variação da energia requerida para orvalhar no ciclo de 24 horas é grande e é ainda maior quando analisados o perfil anual da energia requerida durante o ano. Logo, a metodologia mostra que os equipamentos poderão ser otimizados usando um processo de automação que receberá os dados meteorológicos vistos na metodologia 1, processará estes dados, calculará a energia requerida e comandará o equipamento fazendo os ajustes necessários à produção sustentável, eficiente do ponto de vista energético e volumétrico.

Foram dimensionados e instalados os relés programáveis para ligar e desligar automaticamente de forma independente, o equipamento de refrigeração e o exaustor, usados no protótipo, nos horários de menor energia requerida (Figura 18).

Houve a necessidade de incorporar no processo de automação o medidor de consumo de energia com custo de R\$450,00. Esta energia consumida não é igual à energia requerida e os resultados encontrados foram desprezados em virtude da baixa eficiência do equipamento protótipo.

Várias simulações com operação automática de liga e desliga, freezer e exaustor, em função da temperatura de orvalho e horários, foram realizadas na busca do melhor processo de produção e assim definir as melhores condições para se operar um equipamento de produção de água do orvalho.

Figura 18: Instalação do relés programáveis e medidor de consumo de energia.



Fonte: Autor, (2021).

Instalou-se o sensor de temperatura (Figura 19) para medir a temperatura do ar no interior do equipamento (serpentina) e comparar com a temperatura de orvalho calculada. Passou-se a controlar o fluxo de ar no interior do equipamento usando como parâmetro a temperatura registrada no sensor, posicionado no interior do protótipo, para garantir que a temperatura da serpentina fosse mantida sempre abaixo da temperatura de orvalho,

porém sem permitir a formação de gelo.

Figura 19: Sensor de temperatura, medição do ar passando na serpentina.

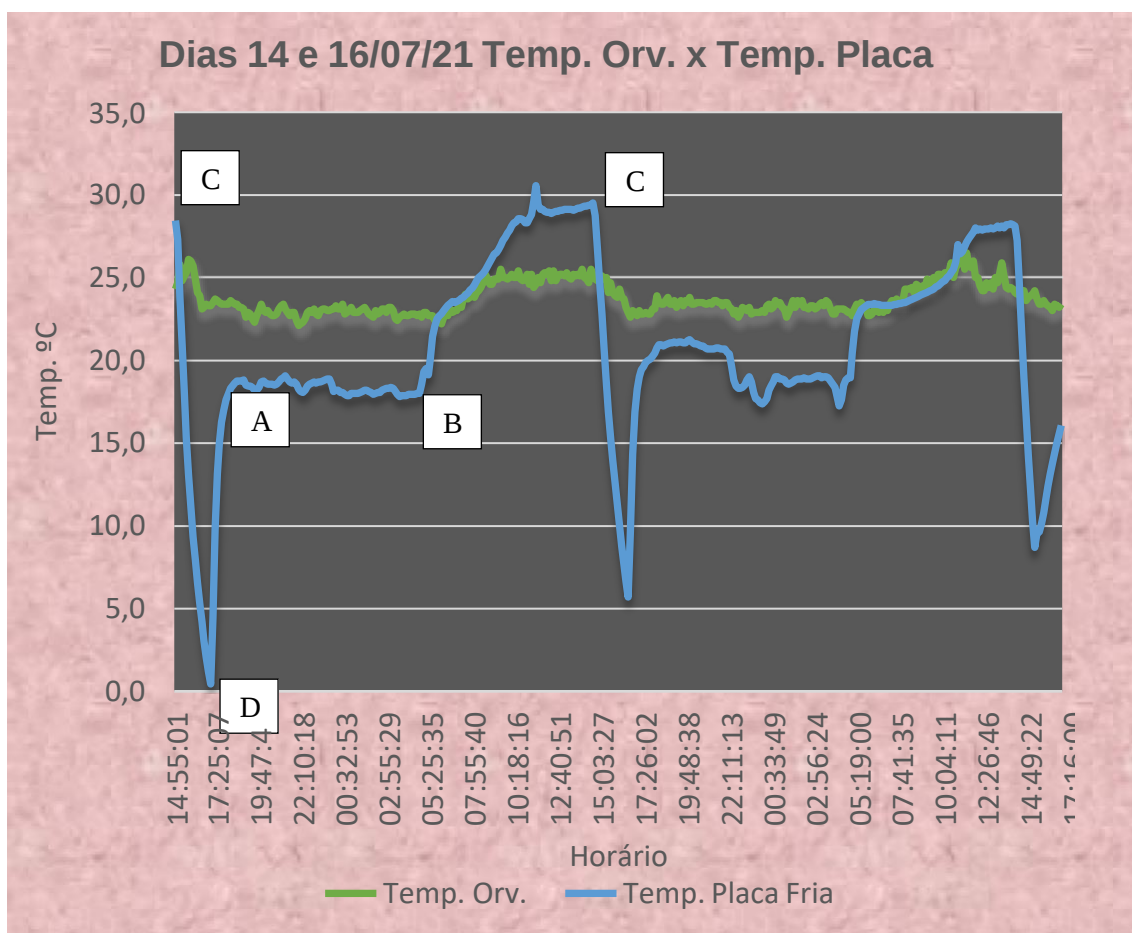


Fonte: Autor, (2021).

O controle do fluxo de ar no interior do protótipo foi realizado com a restrição e aberturado exaustor (saída do ar circulado na parte interior do freezer). Este controle tem fundamental importância na quantidade de água produzida, quanto maior o fluxo de ar inserido no interior do protótipo, maior a quantidade de umidade, maior o volume de água produzida, porém o aumento do fluxo promove o aquecimento da serpentina, acima da temperatura de orvalho (não haverá formação de orvalho). No outro extremo, quanto maior a restrição no fluxo de ar registramos uma menor quantidade de água produzida, motivada por menor quantidade de umidade e pela formação de gelo na serpentina.

O controle no protótipo não foi realizado em malha fechada, ou seja, de forma automática analisando e modulando a temperatura da serpentina e comparando com a temperatura do orvalho, por exemplo. O controle foi realizado definindo os horários de ligar e desligar o freezer e exaustor de forma independente conforme a Figura 20.

Figura 20: Teste no protótipo. Liga/Desliga. Comportamento das variáveis no processo de automação.



Fonte: Autor, (2021).

C – Freezer ligado e Exaustor desligado.

D – Exaustor ligado.

AB – temperatura da placa fria (serpentina) estabilizada pelo controle do fluxo de ar.

B – Freezer desligado

O desenvolvimento do processo no protótipo procurou estabelecer a melhor condição de fluxo de ar no interior de freezer. Quanto maior o fluxo de ar passando pela superfície resfriada (serpentina) maior será a geração de água. Por outro lado, o aumento deste fluxo provoca a elevação da temperatura da superfície fria como consequência a superfície fria se aproxima da temperatura de orvalho diminuindo a formação de condensado (água).

As Figuras 21, 22 e 23 mostram a instalação de alimentação do sistema com uso de energia fotovoltaica como uma alternativa de operação.

Figura 21: Controlador de carga da bateria, carregador e inversor para circuito de alimentação do protótipo.



Fonte: Autor, (2021).

Figura 22: Banco de bateria.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 23: Paineis solares de alimentação do protótipo.



Fonte: Autor, (2021).

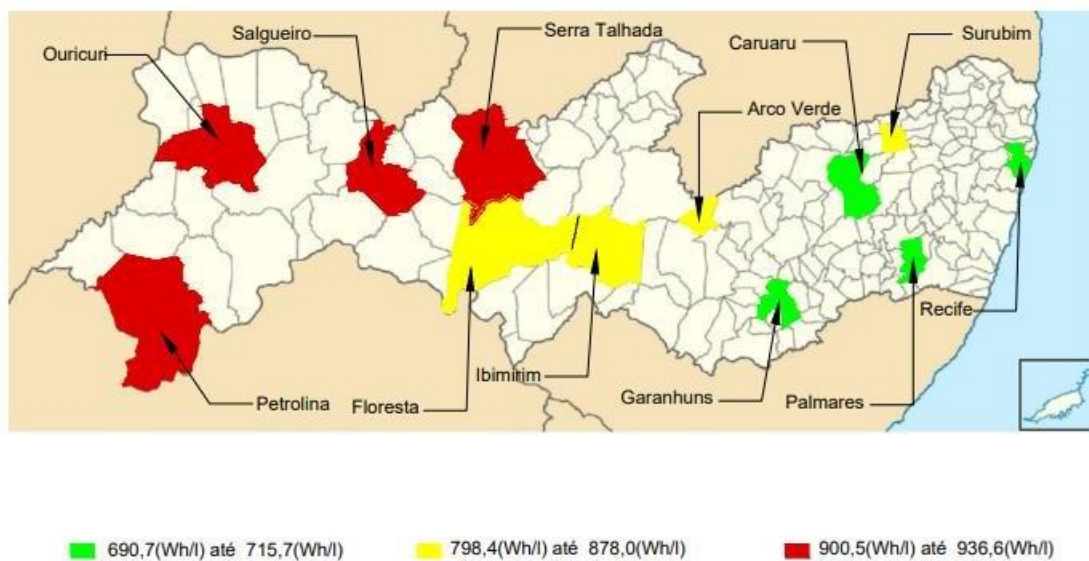
5. – Resultados.

5.1. – Resultado 1. Energia Requerida para Orvalho nos Municípios de Pernambuco.

Foram analisados dados, ano de referência 2020, das estações meteorológicas do INMET nos 12 municípios estudados, com o objetivo de calcular o perfil horário de energia requerida à formação de orvalho.

A Figura 24 ilustra um mapa do estado de Pernambuco, o resultado da média anual dos registros horários da energia requerida, calculado no ano 2020, para produzir um litro de água do orvalho (Wh l^{-1}). Vale salientar que os dados do INMET são registrados de hora em hora em cada estação de medição, e o universo escolhido foi de 01:00 de 01 janeiro de 2020 a 00:00 do dia 31 de dezembro de 2020, totalizando por município cerca de 8700 registros.

Figura 24: Mapa de Pernambuco com média anual dos registros horários (Whl^{-1}) de energia requerida para orvalhar.



Fonte: Cavalcanti, (2021).

Tabela 9: Valores de energia requerida média anual dos registros horários por litro de água produzido.

Município	Média Anual	Registro Horário	
	Whl^{-1}	Mínimo Whl^{-1}	Máximo Wh^{-1}
Garanhuns	690,6	627,17	1579,65
Palmares	695,6	627,17	1299,52
Caruaru	696,1	627,17	1482,77
Recife	715,7	643,51	1001,90
Arco Verde	798,4	635,85	2390,22
Surubim	808,9	648,09	1552,75
Ibimirim	835,3	639,25	2468,79
Floresta	878,0	648,19	2867,23
Petrolina	900,5	648,21	2475,27
Serra	911,1	652,05	3640,36
Salgueiro	922,8	625,05	2776,69
Ouricuri	936,6	627,17	3622,16

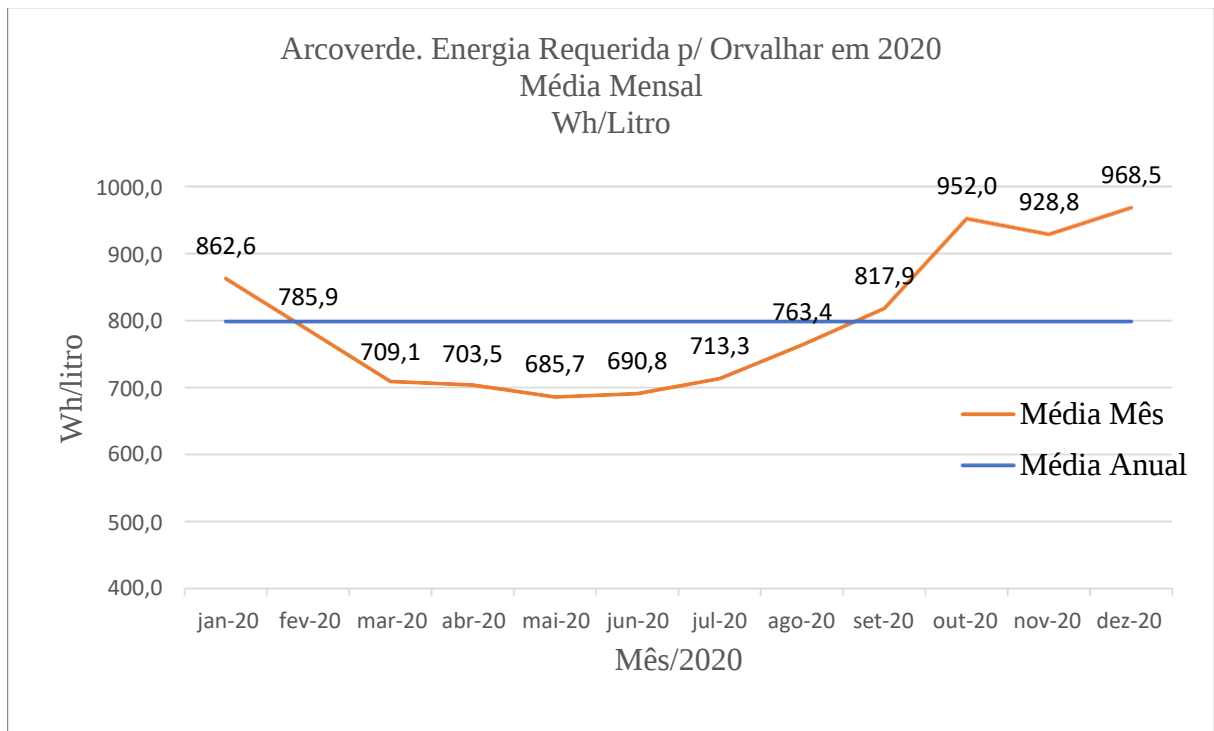
Fonte: Autor, (2021).

Considerando a energia média anual para Arcoverde de $798,94 \text{ Whl}^{-1}$ (tabela 5.1.1), um volume de água desejado de 30 litros por dia e trabalhando 10 horas por dia, a potência requerida no ponto de orvalho será de 2,4 kW. Esta será a potência requerida no ponto de orvalho, para se saber a potência instalada, ou seja, a potência do equipamento e o consumo de energia, será necessário o fornecimento da eficiência, capacidade de refrigeração do equipamento por parte do fabricante. A potência do equipamento (potência instalada) é o número que definirá todo dimensionamento e investimento, não só de equipamento, como também das instalações elétricas (cabo elétrico, quadro elétrico, disjuntores, contactores, reles, aterramento, softstart, transformadores, entre outros).

Vale registrar que existe uma variação anual muito grande na energia requerida e esta variação é determinante para o dimensionamento de projetos se torne sustentável.

Em seguida, foram apresentados os gráficos da média mensal da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) nos meses de 2020 assim como o perfil de energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) agrupado por horário do dia, identificando o comportamento da menor e maior energia requerida durante os horários dos dias de 2020.

Figura 25: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Arcoverde.



Fonte: Autor, (2021).

Figura 26: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Arcoverde.

Fonte: Autor, (2021).

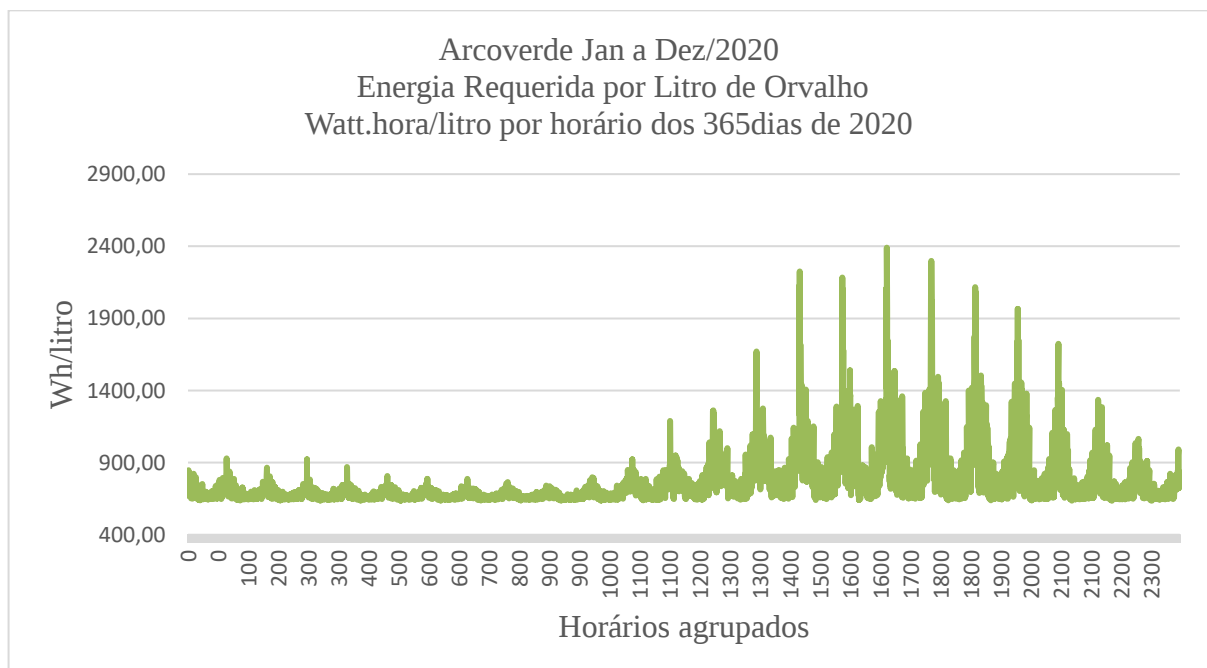
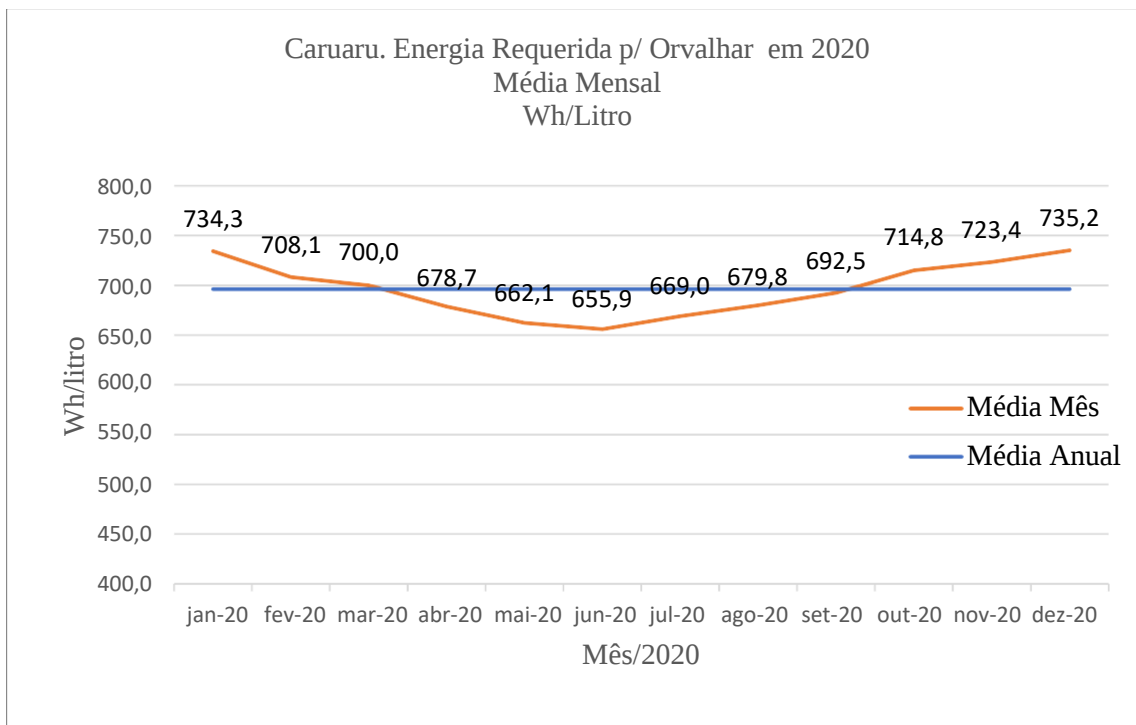
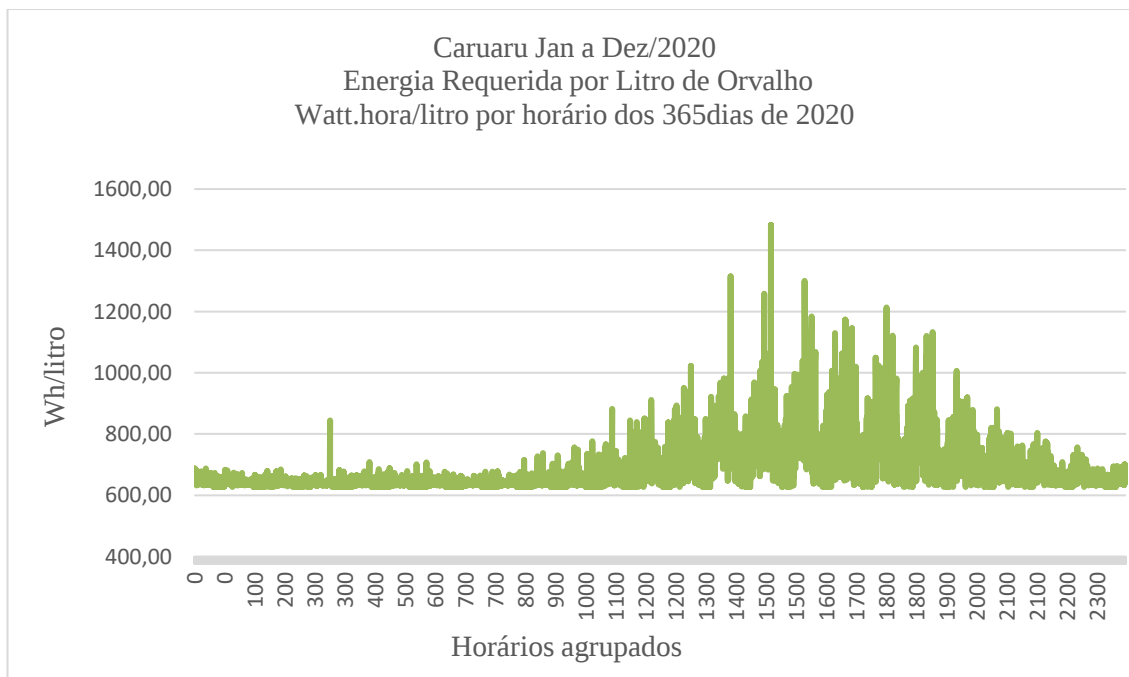


Figura 27: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Caruaru.



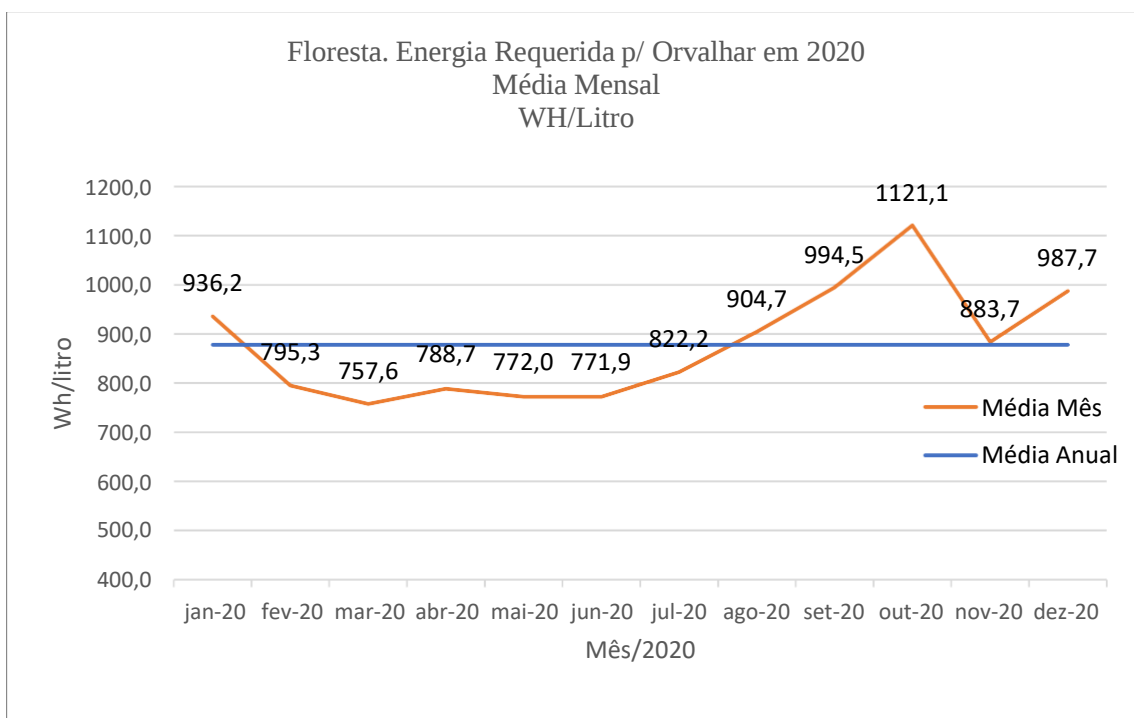
Fonte: Autor, (2021).

Figura 28: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Caruaru.



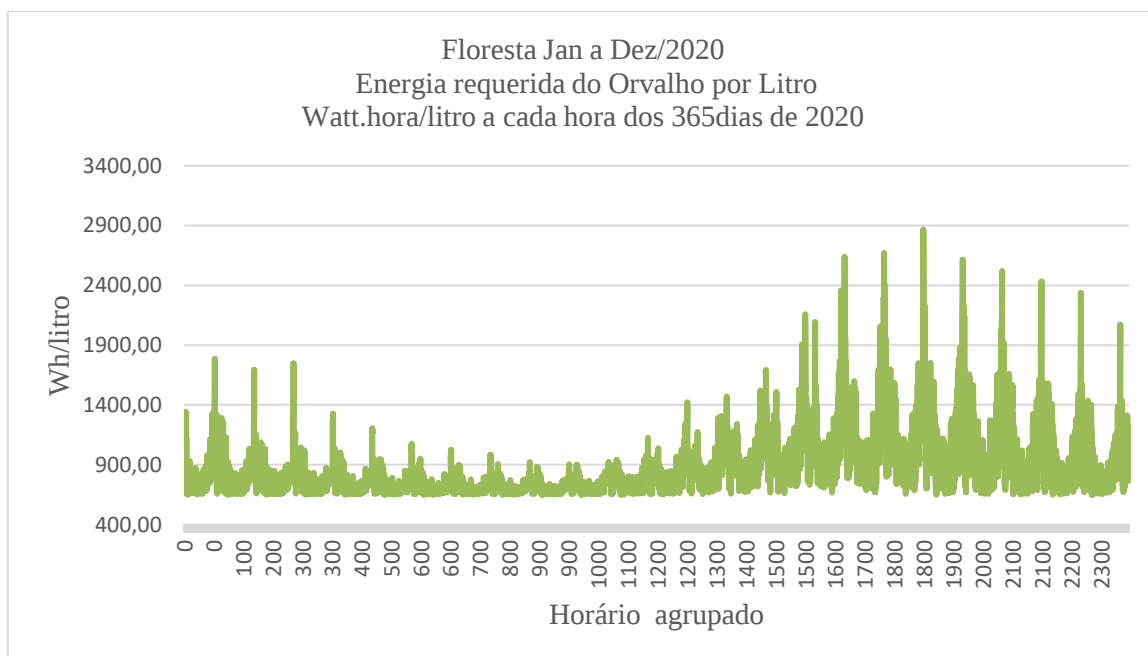
Fonte: Autor, (2021).

Figura 29: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Floresta.



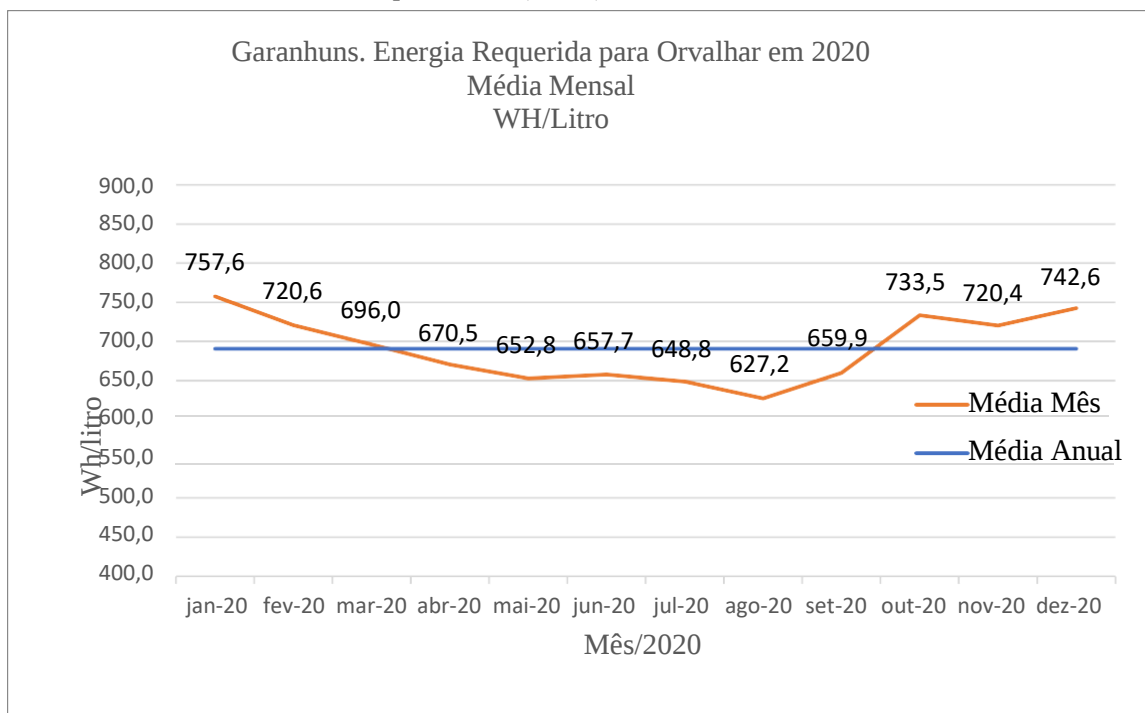
Fonte: Autor, (2021).

Figura 30: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Floresta.



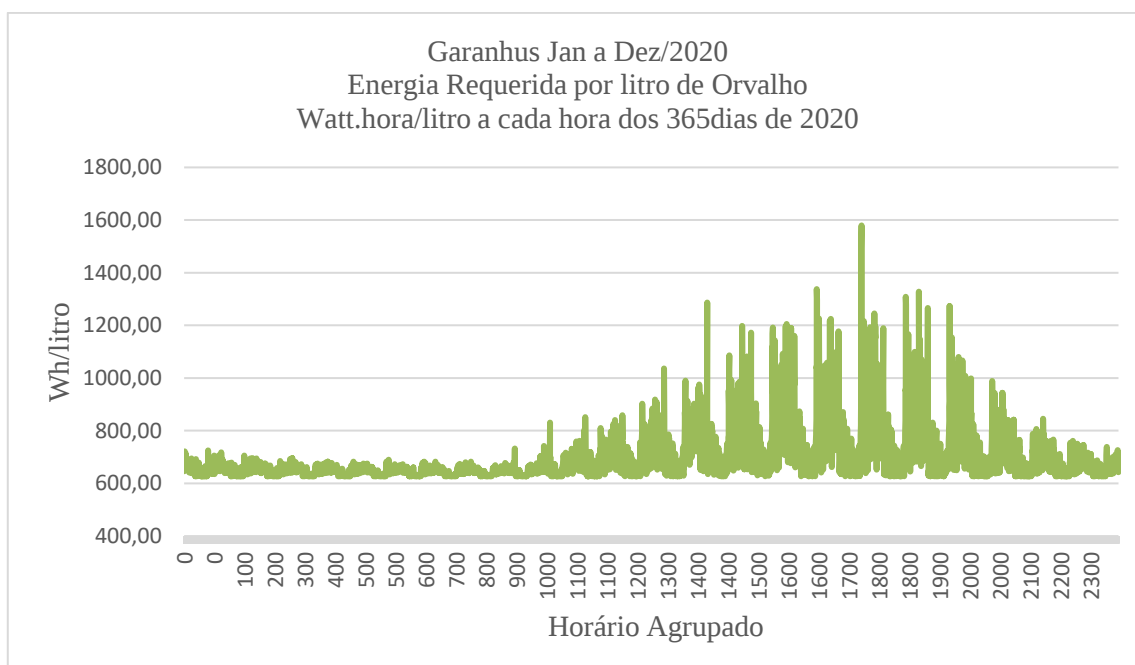
Fonte: Autor, (2021).

Figura 31: - Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Garanhuns.



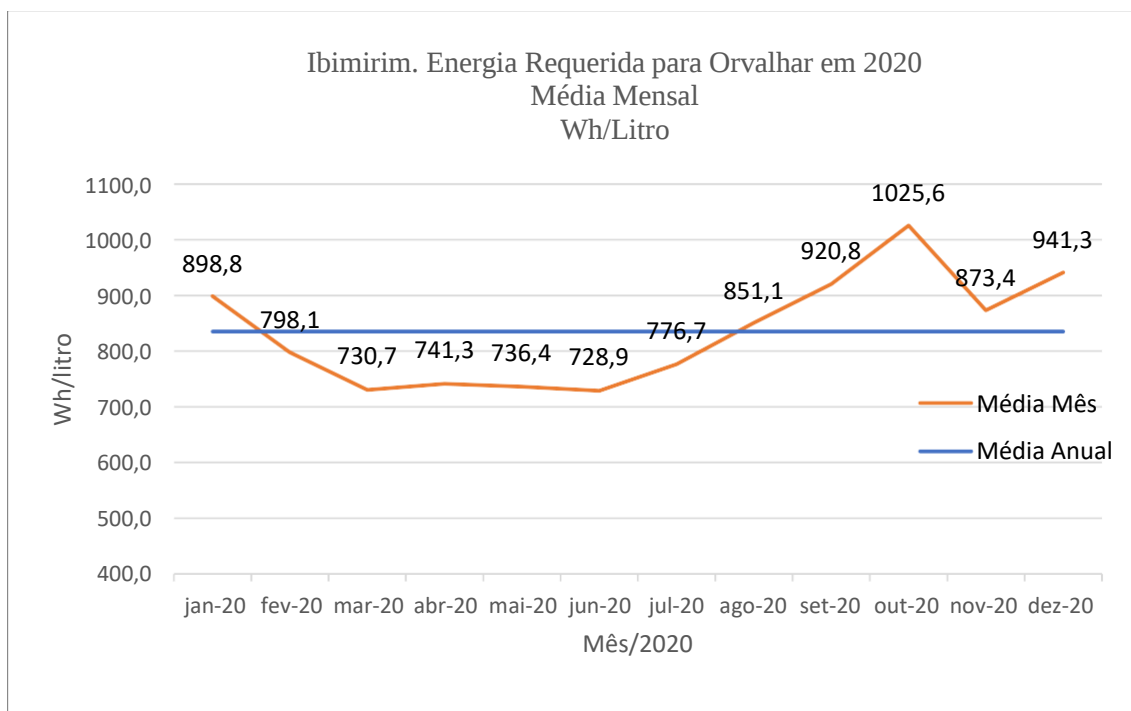
Fonte: Autor, (2021).

Figura 32: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Garanhuns.



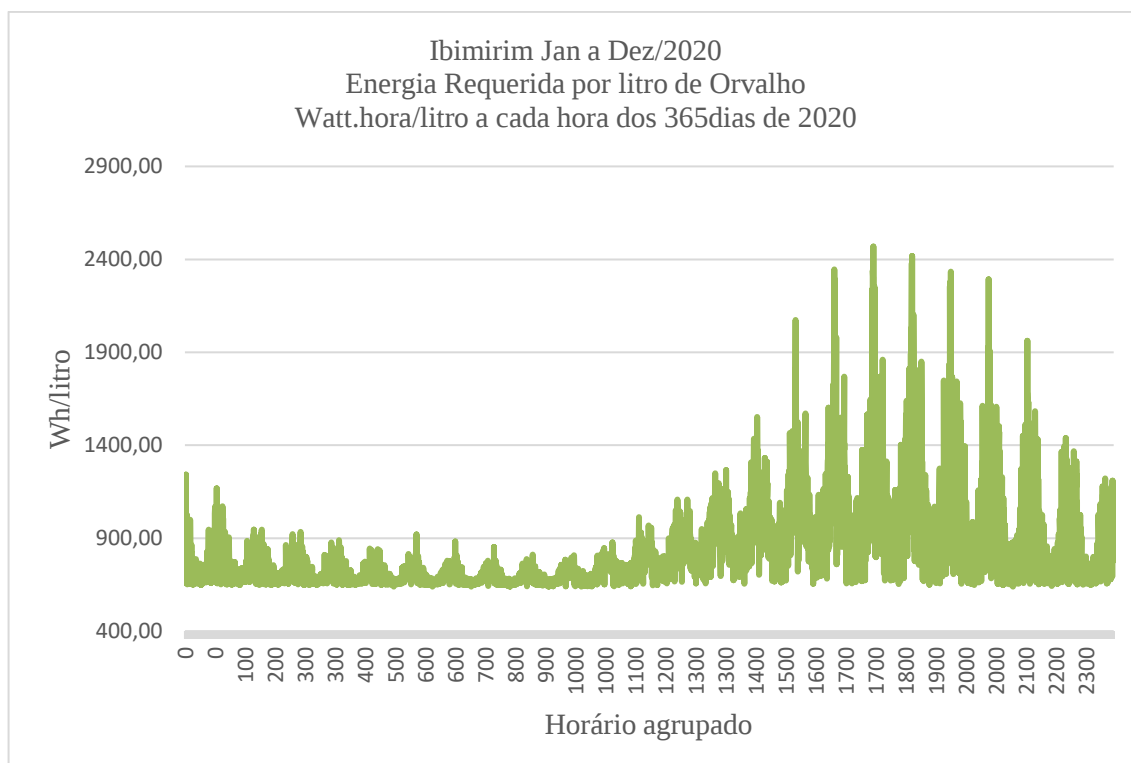
Fonte: Autor, (2021).

Figura 33: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Ibimirim.



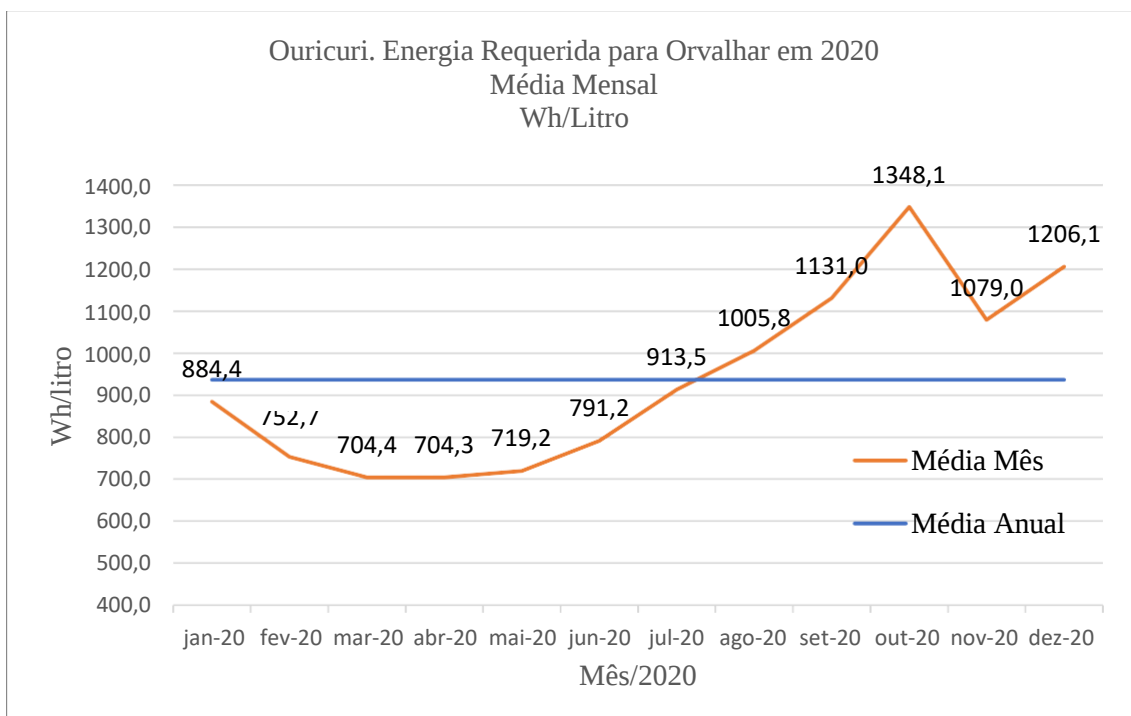
Fonte: Autor, (2021).

Figura 34: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Ibimirim.



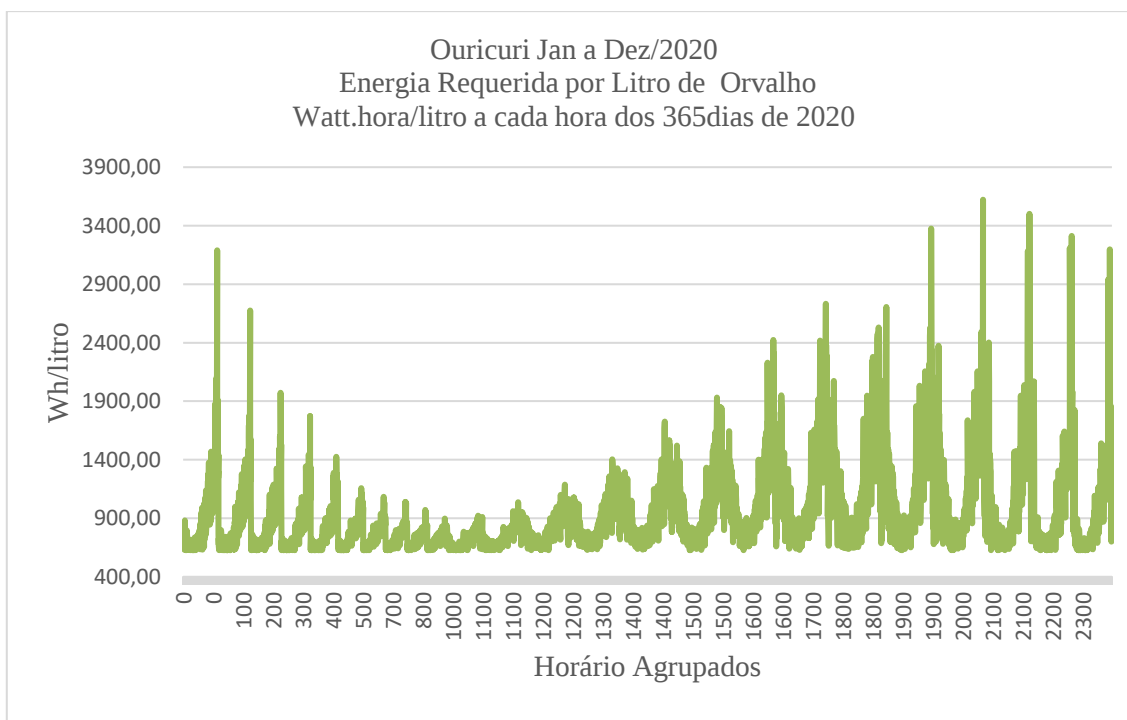
Fonte: Autor, (2021).

Figura 35: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Ouricuri.



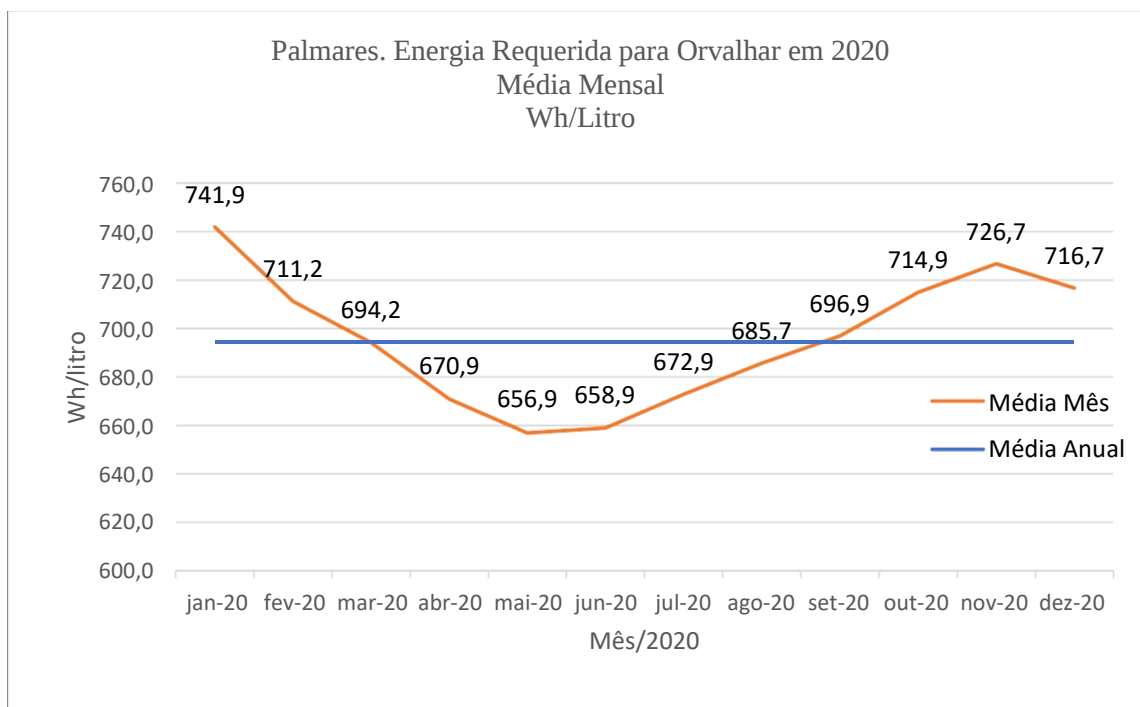
Fonte: Autor, (2021).

Figura 36: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Ouricuri.



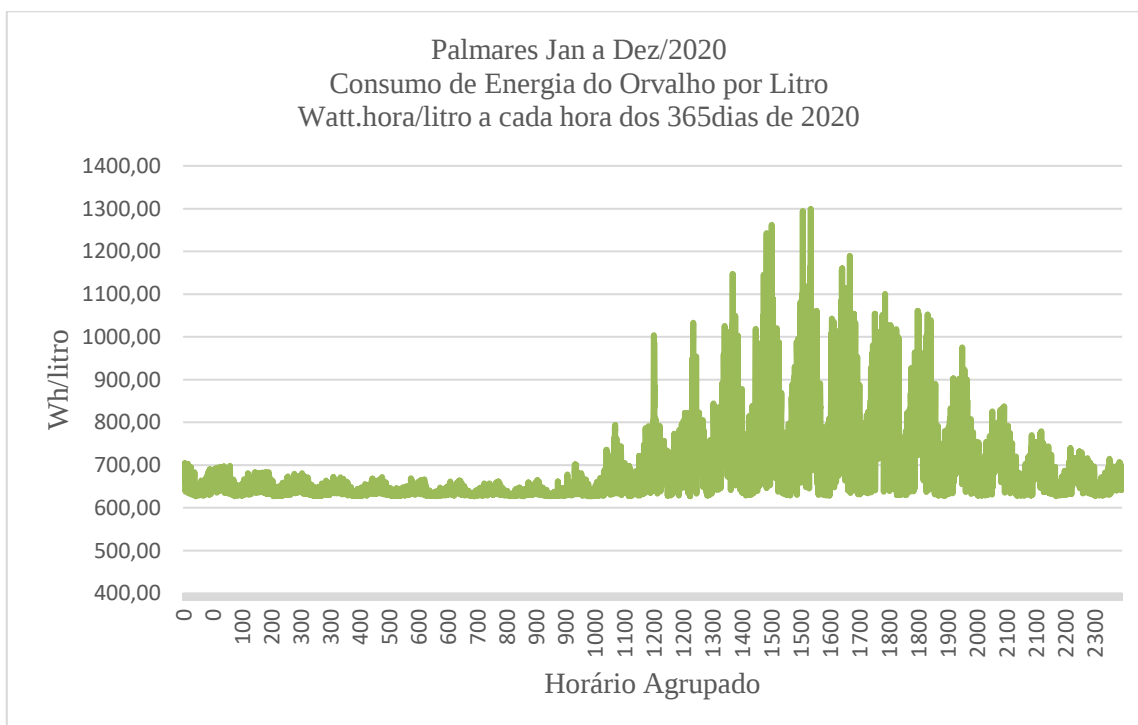
Fonte: Autor, (2021).

Figura 37: - Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Palmares.



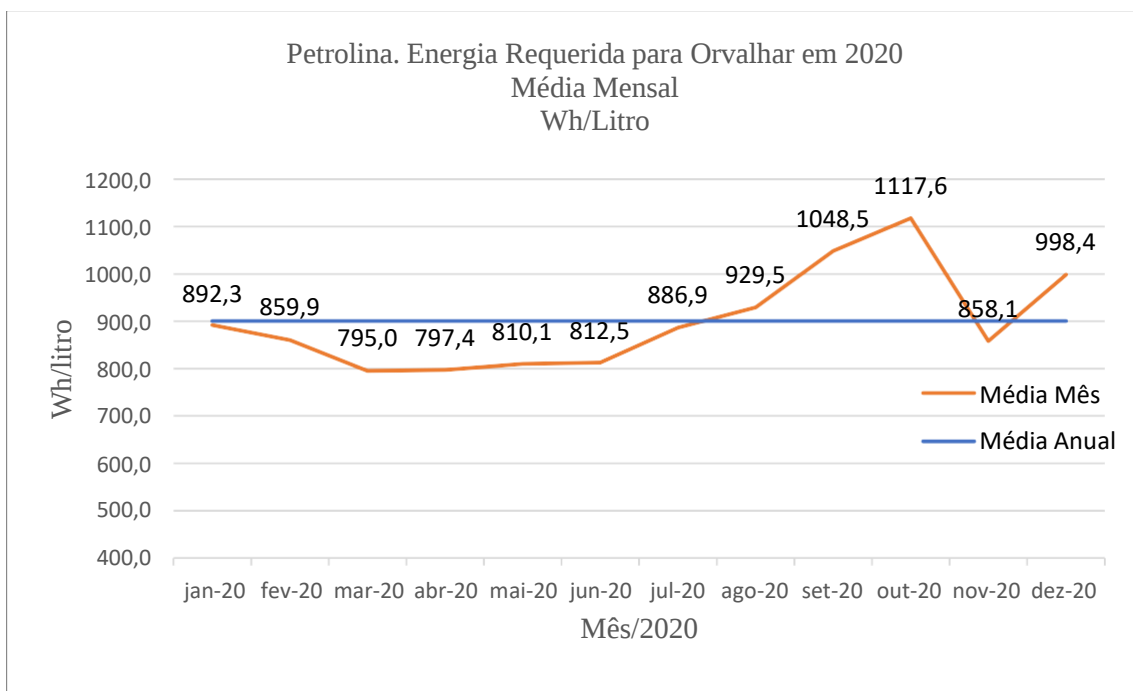
Fonte: Autor, (2021).

Figura 38: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Palmares.



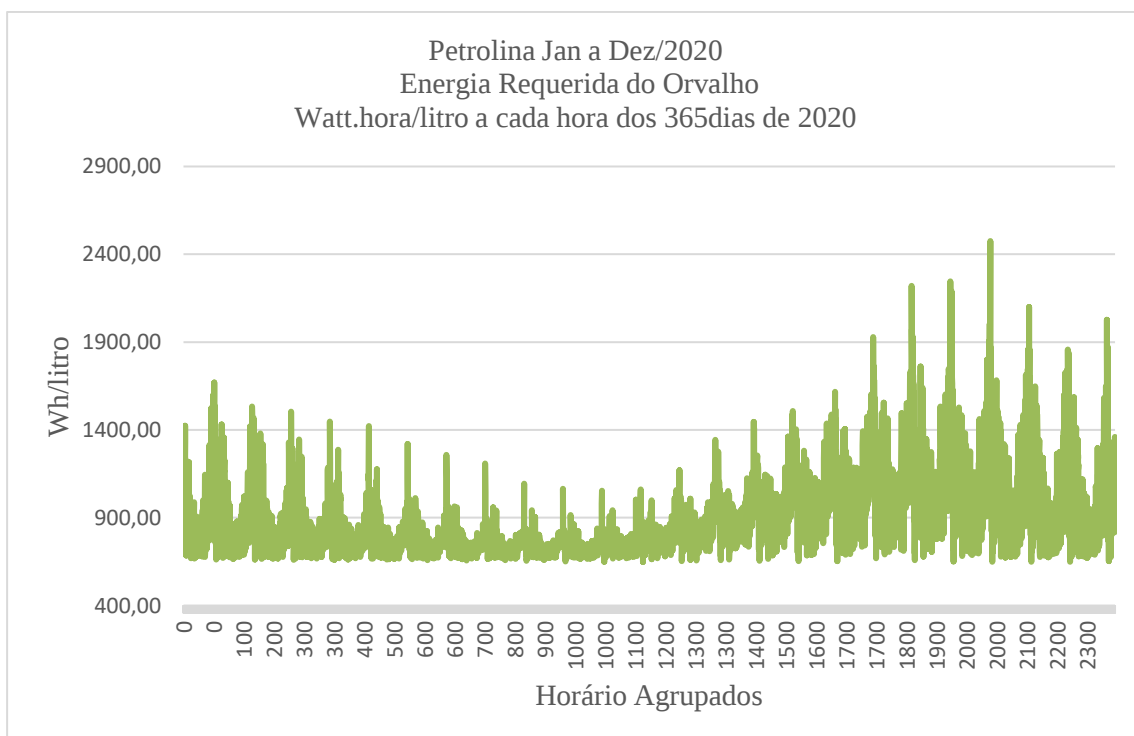
Fonte: Autor, (2021).

Figura 39: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Petrolina.



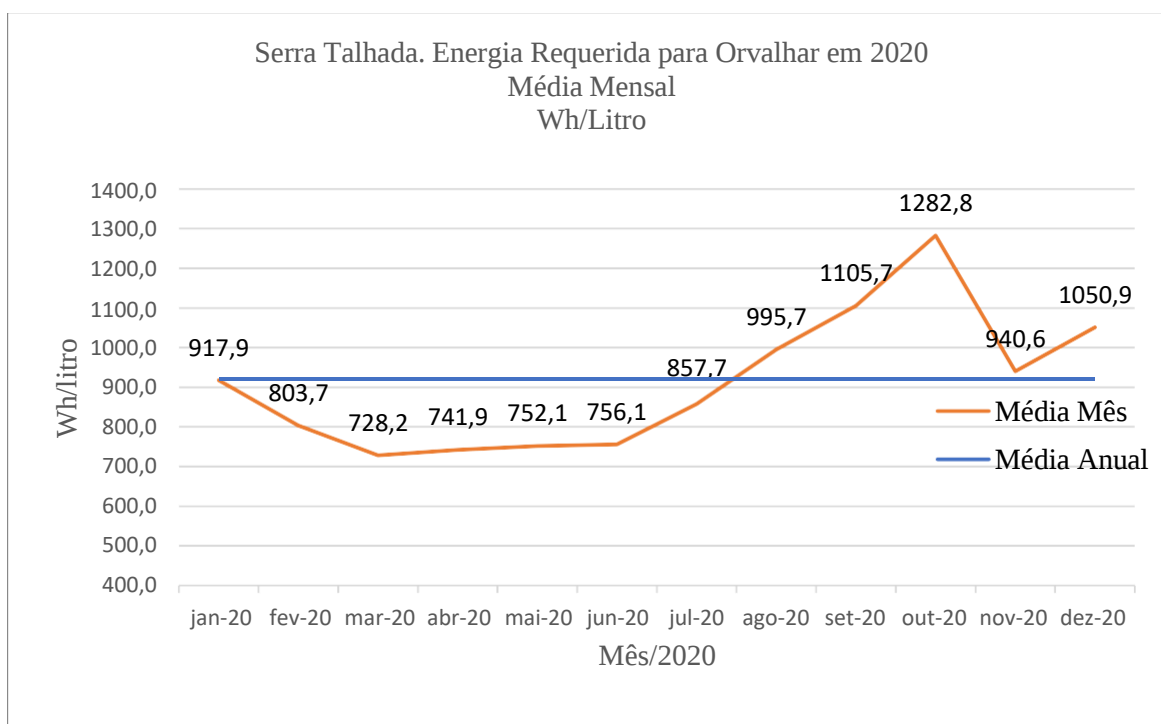
Fonte: Autor, (2021).

Figura 40: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Petrolina.



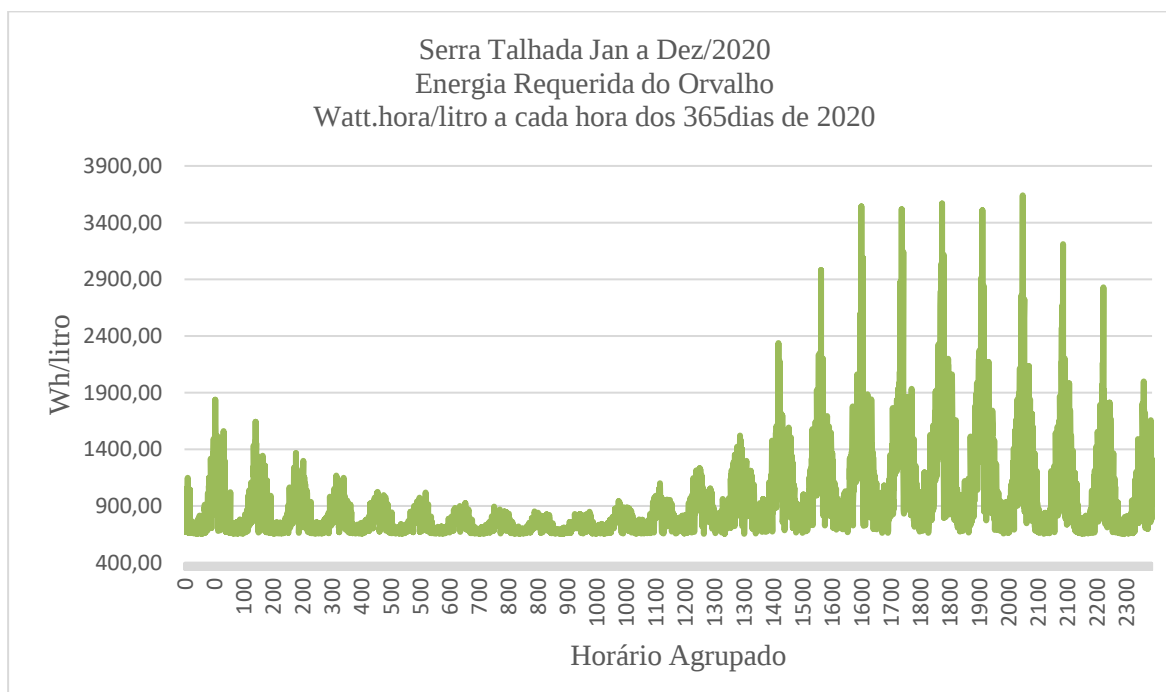
Fonte: Autor, (2021).

Figura 41: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Serra Talhada.



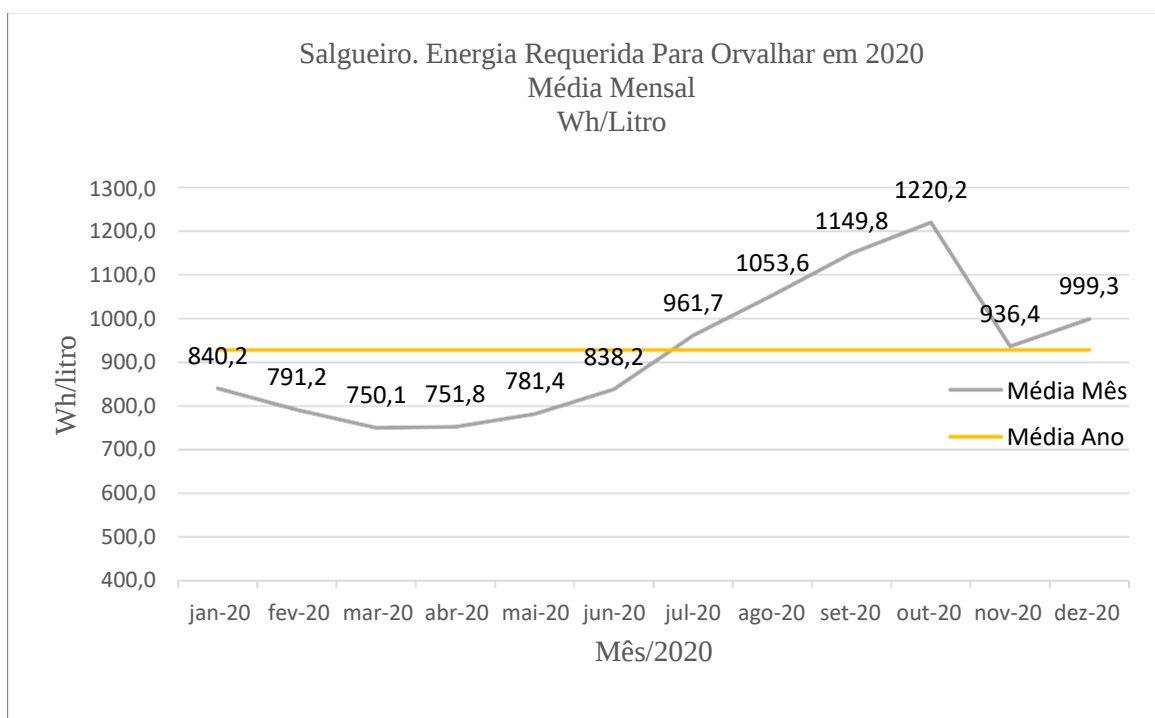
Fonte: Autor, (2021).

Figura 42: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Serra Talhada.



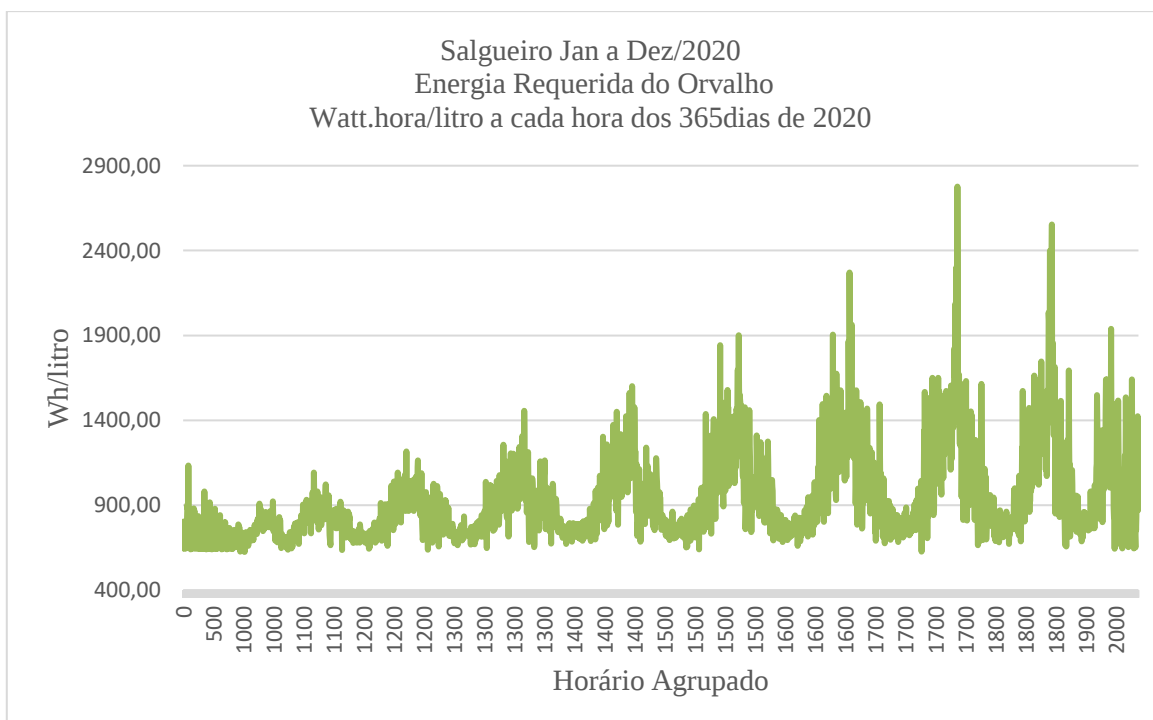
Fonte: Autor, (2021).

Figura 43: : Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário Salgueiro (registros reduzidos na estação A370 ano 2020) durante 2900 horas.



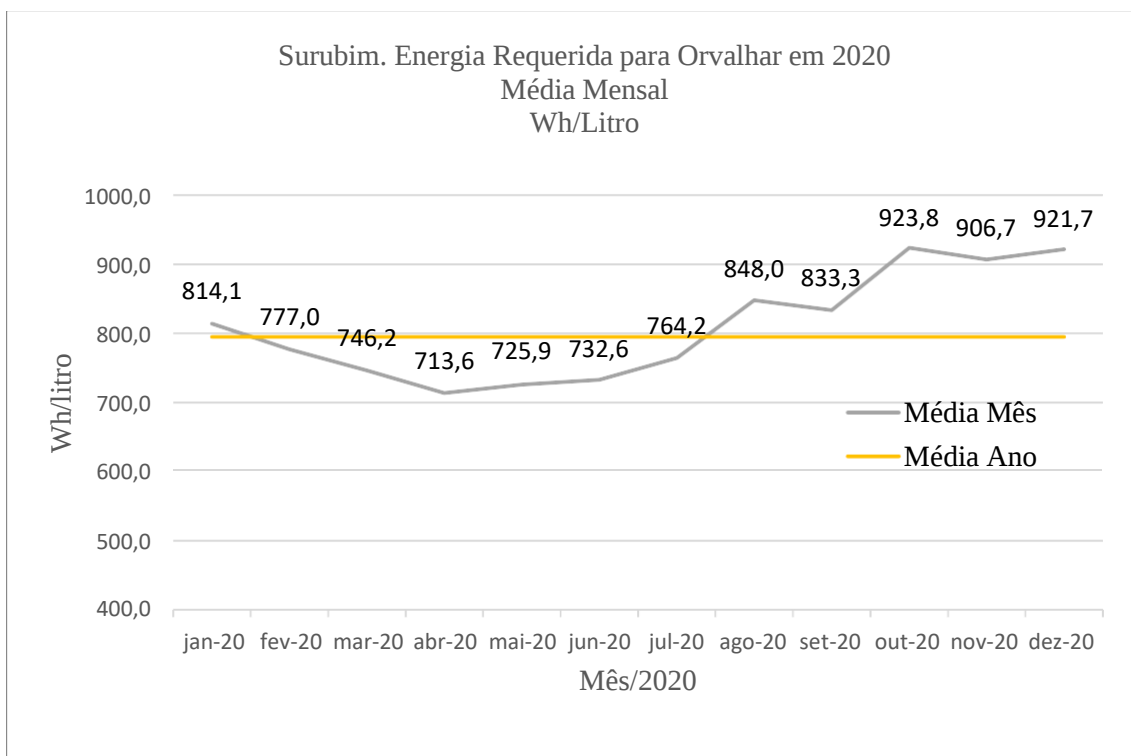
Fonte: Autor, (2021).

Figura 44: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Salgueiro.



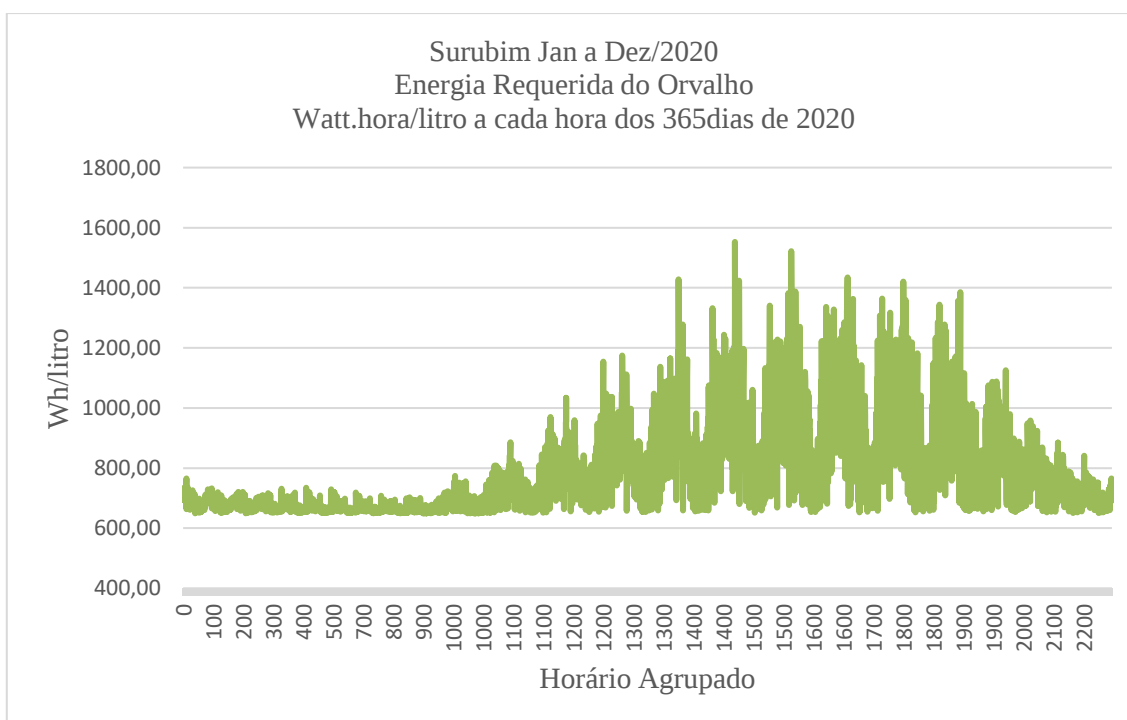
Fonte: Autor, (2021).

Figura 45: - Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Surubim.



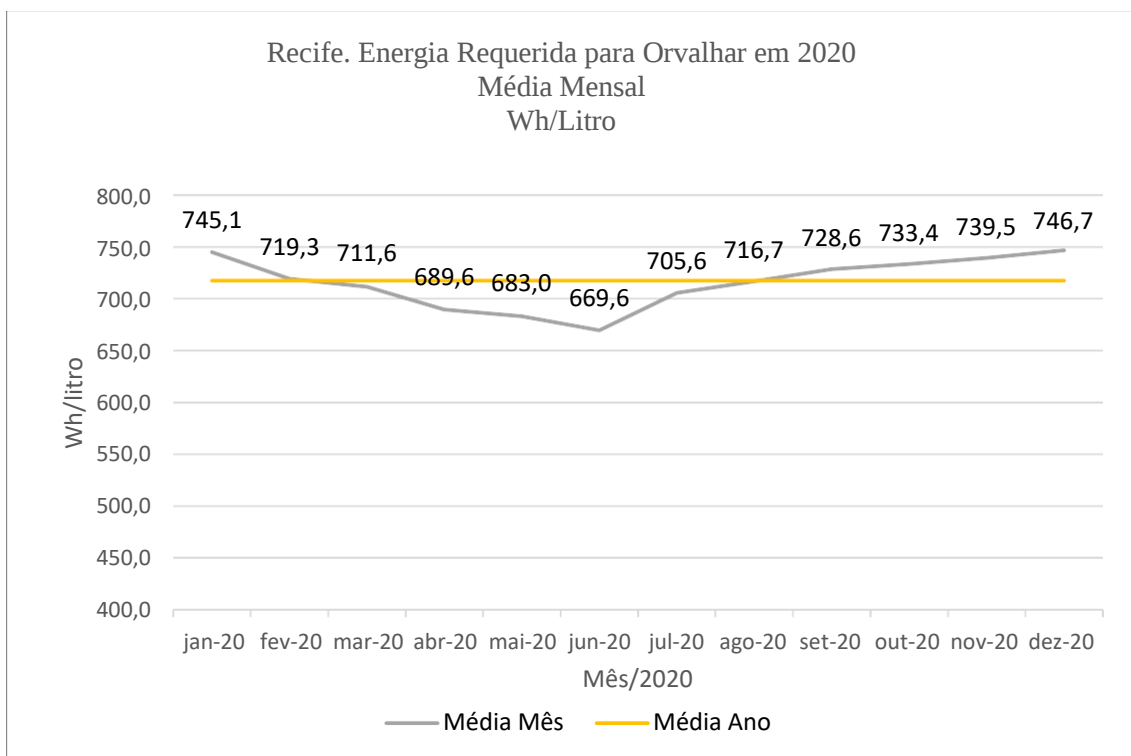
Fonte: Autor, (2021).

Figura 46: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Surubim.



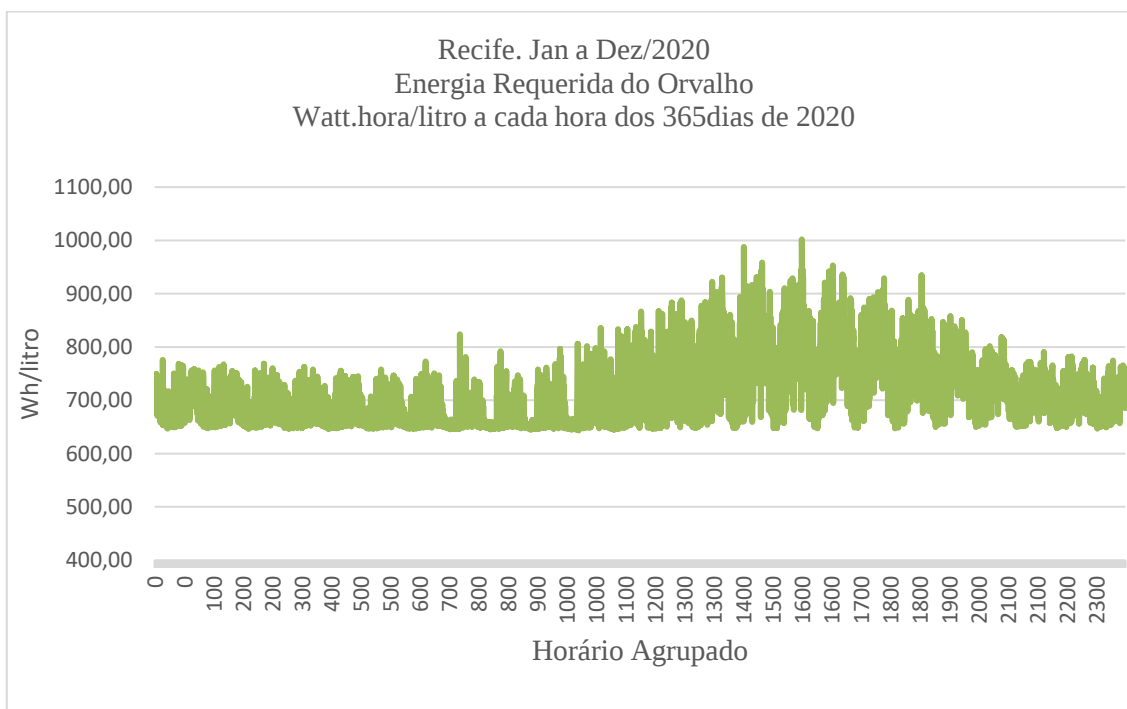
Fonte: Autor, (2021).

Figura 47: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Recife.



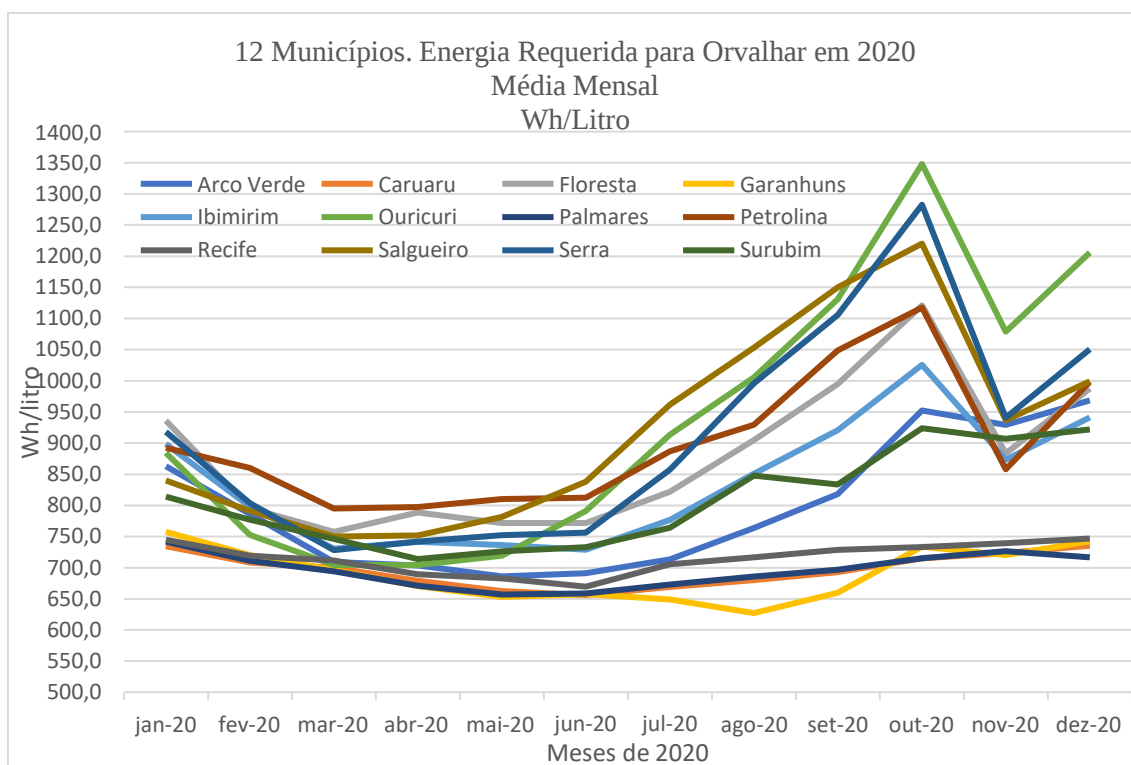
Fonte: Autor, (2021).

Figura 48: - Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário em Recife.



Fonte: Autor, (2021).

Figura 49: Comparativo entre municípios. Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Wh^{-1}).



Fonte: Autor, (2021).

5.2. – Resultado 2 – Dispositivo e Sistema de Medição da Energia Requerida à Formação do Orvalho e Custo do Consumo de Energia.

Neste tópico serão apresentados o desenvolvimento do sistema e dispositivo capaz de medir as variáveis meteorológicas e calcular a energia requerida na produção de orvalho em qualquer localidade onde haja interesse em conhecer o perfil energético do orvalho.

Torna-se possível:

- Especificar ou projetar de forma sustentável os equipamentos;
- Dimensionar os investimentos necessários à instalação;
- Mensurar o custo de consumo de energia elétrica.

A Tabela 10 mostra os registros meteorológicos e o cálculo da energia requerida em Wh por litro de orvalho realizados pelo sistema e dispositivo desenvolvido.

Tabela 10: – Dados registrados pelo sistema desenvolvido na pesquisa e cálculo da energia requerida em tempo real.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
SUAPE	Horário	Tar	UR	To	Expoente	UA	Q = V/UA	Et	Et	Potencial
Data	Hora	Temp. °C	Umi. %	Pto O °C		g água/m ³	m ³ ar/h	kJ	Wh	Wh/l
01/03/2021	14:29:26	25,7	85,5	23,1	5,39	20,50	40,48	1992,40	553,89	667,33
01/03/2021	15:29:25	26,8	80,1	23,1	5,75	20,42	40,64	2043,82	568,18	684,55
01/03/2021	16:29:25	26,7	86,7	24,3	5,72	21,98	37,76	1975,73	549,25	661,75
01/03/2021	17:29:24	25	88,7	23	5,17	20,45	40,58	1964,96	546,26	658,14
01/03/2021	18:29:23	26,1	85,8	23,6	5,52	21,04	39,45	1984,85	551,79	664,80
01/03/2021	19:29:22	26,1	85,7	23,5	5,52	21,02	39,49	1989,48	553,07	666,35
01/03/2021	20:29:21	26,3	83,1	23,2	5,58	20,61	40,28	2014,75	560,10	674,82
01/03/2021	21:29:20	25,8	83,7	22,8	5,42	20,19	41,12	2013,04	559,62	674,25
01/03/2021	22:29:19	26,4	85,6	23,8	5,62	21,35	38,88	1987,67	552,57	665,75
01/03/2021	23:29:18	25,2	89,2	23,3	5,23	20,80	39,90	1958,87	544,56	656,10
02/03/2021	00:29:17	24,3	92,7	23,1	4,96	20,55	40,39	1927,71	535,90	645,67
02/03/2021	01:29:17	23,9	93,9	22,9	4,84	20,35	40,79	1918,96	533,47	642,74
02/03/2021	02:29:16	23,6	94,6	22,7	4,75	20,15	41,18	1914,71	532,29	641,31
02/03/2021	03:29:15	23,5	94,3	22,5	4,73	19,98	41,55	1919,82	533,71	643,03
02/03/2021	04:29:14	23,2	95,1	22,4	4,64	19,80	41,91	1910,68	531,17	639,96
02/03/2021	05:29:13	23,1	95,7	22,4	4,61	19,82	41,89	1905,89	529,84	638,36

Fonte: Autor, (2021).

Com os resultados calculados da energia requerida, o custo do consumo de energia elétrica é facilmente mensurado, basta saber o valor do R\$(kWh)⁻¹ da concessionária na localidade onde se deseja instalar o equipamento e a eficiência do equipamento que deverá ser fornecido pelo fabricante.

Supondo a energia consumida igual a 0,3 da energia requerida (a energia de refrigeração é de 2 a 4 vezes maior que a energia elétrica consumida, ou seja, para cada 1 kWh de energia elétrica consumida se consegue de 2 a 4 kWh de refrigeração), usando como exemplo a média mensal de energia requerida no município de Surubim, mês de abril de 2020 registrada com valor de 713,6 Whl⁻¹ (gráfico 5.1.21), o volume desejado de 30 litros diários, trabalhando ininterruptamente 30 dias do mês e o valor do kWh como sendo R\$1,00, o custo mensal da energia consumida será de R\$214,08, ou ainda R\$0,24 por litro no período estabelecido. Se houver produção no mês de dezembro de 2020 onde a energia requerida é de 921,7 Whl⁻¹ o custo com consumo de energia será de R\$0,31 por litro, para as mesmas condições de volume e R\$(kWh)⁻¹ de abril de 2020.

5.3. - Resultado 3 - Lógica Desenvolvida para Automação do Equipamento de Produção de Água do Orvalho.

Baseado nos dados obtidos com a construção do protótipo e no desenvolvimento da metodologia, foram definidas as variáveis e controles que um equipamento de produção de água do orvalho deverá apresentar para obter resultados satisfatórios com

a máxima eficiência. A seguir estão as variáveis e comentários de como o sistema de automação deve tratá-las.

- 1 – Temperatura do ar (T) - Leitura do Sensor de Temperatura do Ar .
- 2 – Umidade relativa do ar (UR) - Leitura do Sensor de Umidade do Ar.
- 3 – Temperatura de orvalho (To) - Cálculo Temperatura de Orvalho (Maguns Tetens).
- 4 – Cálculo da variável umidade absoluta (UA).
- 5 – A automação verifica se a vazão de ar (Q) (ver metodologia 2) inserida no equipamento está compatível com o volume de água desejado (V). Se sim, mantém os parâmetros, se não aciona comando para ajustar a rotação do exaustor buscando manter o volume desejado (V).
- 6 – Verifica se a temperatura do ar na saída do evaporador (Tev) do equipamento (parte fria da refrigeração) em relação a temperatura de orvalho (To) mantém o intervalo definido como $0,90 T_o < T_{ev} < T_o$. O construtor do equipamento afere a Tev e modula o equipamento mantendo o intervalo.
- 7 – Definir no programa de automação do equipamento a faixa de energia requerida (Er) onde se deseja operar. Essa faixa é conhecida com um estudo anteriormente realizado na região de instalação do equipamento. Operar automaticamente a função do liga/desliga quando da energia fora de faixa. Vale lembrar que a energia requerida para orvalhar é diferente da energia consumida pelo equipamento que dependerá do tipo, do fabricante da máquina e do fluido refrigerante
- 8 – A função de ligar e desligar pode também ser definida por horários. Definir os horários do dia de menor energia requerida. Hora início de operação (Hi) liga o equipamento e hora final de operação (Hf) desliga o equipamento, Input de Hf e Hi no algoritmo. Ver perfil de energia requerida por horário no item resultados.
Preciso alertar que a função liga/desliga deve ser estabelecida levando-se em conta as restrições do equipamento e em caso do fornecimento de energia fotovoltaica, esse liga e desliga terá grande impacto no dimensionamento do sistema acionada por fonte solar.
- 9 – Medir e registrar o consumo total de energia pelo equipamento em operação.
- 10 – Comparar a energia consumida, medição (Ec) do equipamento com a energia requerida (Er) calculada pelo algoritmo do sistema desenvolvido na metodologia 2. A energia requerida dividida pela energia total consumida fornece a eficiência do equipamento.
- 11 – Registrar todos esses dados e gerar relatórios de performance do equipamento

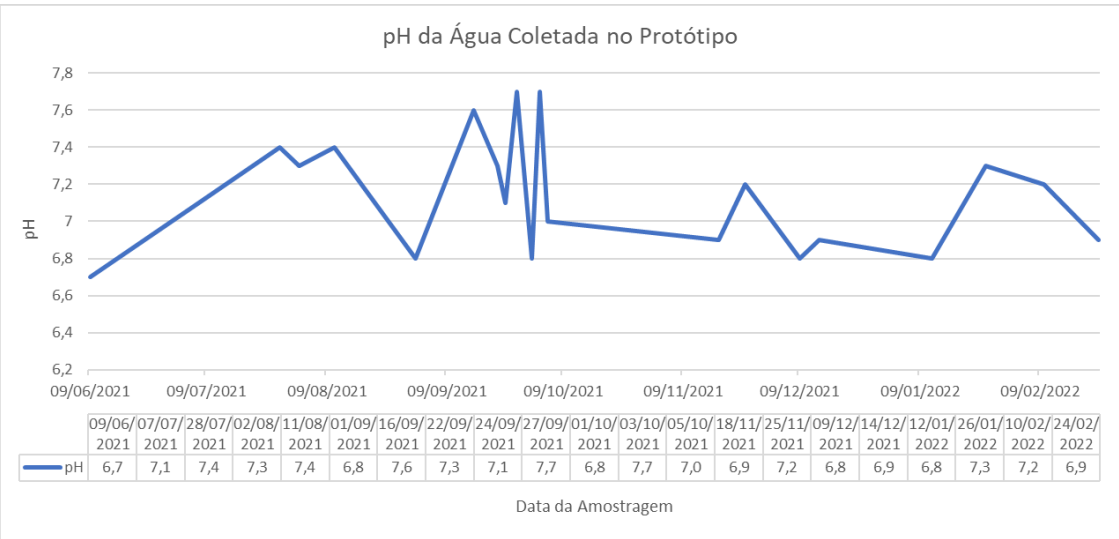
gerador de água do orvalho.

Local, Data, hora, T, UR, To, UA, Q, V, Er, Ec, Eficiência.

5.4.– Resultado 4. Qualidade da Água Produzida no Equipamento Protótipo Porto de Suape.

Com o volume condensado de orvalho produzido pelo protótipo realizamos várias medições de qualidade da água registrando os valores de pH e condutividade elétrica $\mu\text{S.cm}^{-1}$. Os resultados estão representados nas Figuras

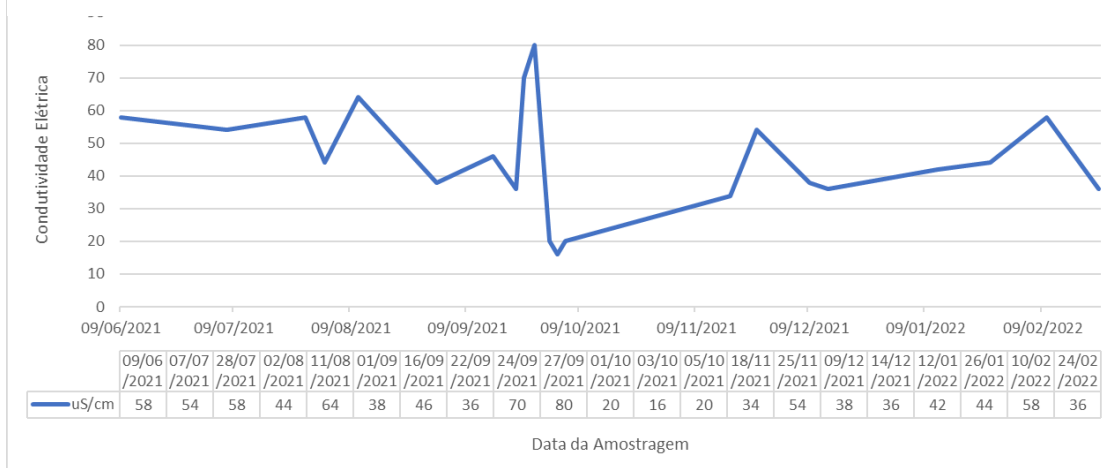
Figura 50: Dados de pH registrados através das amostras da água de orvalho produzida no



Fonte: Autor, (2021).

Segundo o Ministério da Saúde, portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011 o recomendado no sistema de distribuição é que o pH da água seja mantido na faixa de 6,0a 9,5. Os valores de pH nos volumes produzidos no protótipo estão aprovados.

Figura 51: Dados de condutividade elétrica registrados através das amostras da água de orvalho produzida no protótipo.



Fonte: Autor, (2021).

A portaria nº 2.914/2011 não estabelece limites para a condutividade elétrica em água destinada ao consumo humano. (Batista *et al.*, 2019). Para o consumo humano, uma água mineral precisa ter a condutividade dentro da faixa entre 50 e 500 uS/cm. (Santos; Samuelson, 2022).

É possível observar que os valores encontrados na produção de água do protótipo (Figura 51) são muito próximos dos resultados especificados para água mineral. Os resultados abaixo são possíveis de serem corrigidos através da adição de sais.

6 – Conclusões e Comentários.

Com os gráficos em mãos fica facilmente compreensível o perfil comportamental da energia requerida para produzir água a partir da condensação do vapor d'água existente na atmosfera.

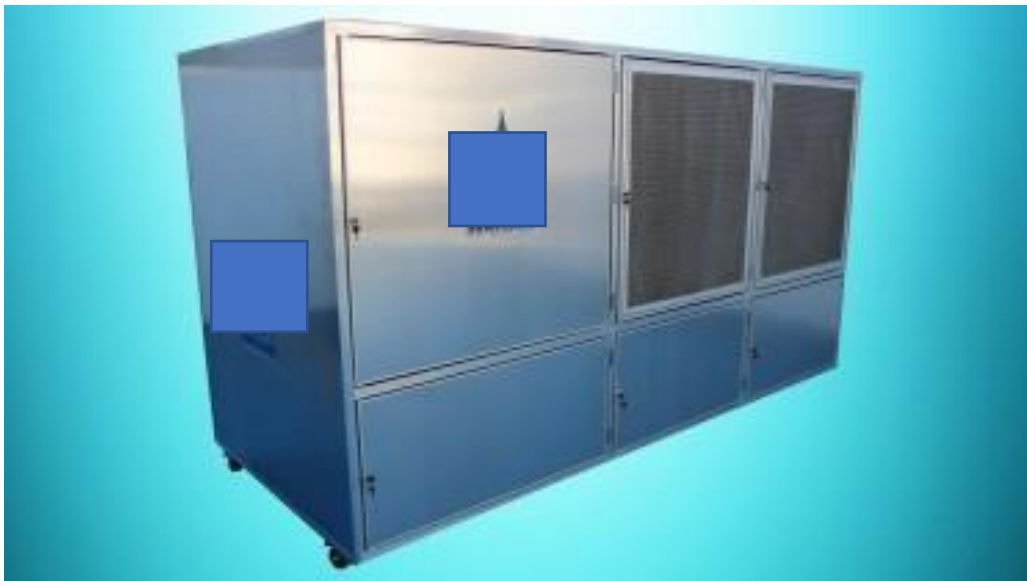
Através de alguns exemplos e simulações foi fixado o domínio sobre as condições para discutir tecnicamente, dimensionar e especificar um equipamento de produção de água do orvalho existente no mercado ou equipamento a ser produzido sob demanda (projeto). Abrindo o caminho para que as negociações com produtores de equipamentos desta natureza sejam realizadas com alto grau de suporte técnico para configurar resultados eficientes, não só do ponto de vista energético como na performance de entrega, ou seja, produção almejada bastante próxima da realizada.

As especificações das máquinas existentes no mercado deixam a desejar nos aspectos técnico e operacional. A simples aquisição dessas máquinas sem uma análise da energia requerida e uma exaustiva discussão técnica levará ao insucesso do projeto almejado.

Veja o exemplo da máquina de produção de água da atmosfera com especificação do fabricante incluído a capacidade de produção.

Para as condições de temperatura do ar de 28°C e umidade relativa de 80% apresentadas na especificação do equipamento, foi calculada uma energia requerida de 687,61Wh por litro de orvalho produzido.

Considerando uma eficiência de refrigeração de 3, calculou-se a energia elétrica de consumo na ordem de 229,20 Wh por litro, número compatível com a especificação de consumo médio de 200 Wh por litro fornecido pelo fabricante.



Especificações

- Capacidade máxima de produção diária: 500 Litros (Umidade: 80% e Temperatura: 28° C)
- Voltagem de funcionamento: 230 Volts AC - 60 Hz.
- Peso líquido drenado: = 400 Kg.
- Dimensões do produtor de água: A=170 cm. x L=250 cm. x P=110 cm.
- Capacidade de armazenamento de água nos tanques internos = 400 Litros.
- Consumo médio do produtor de água: 200 Watts por litro.
- Material produtor de água: Alumínio ou Aço Inox*

Porém a capacidade de produção de 500 litros diários é para uma condição

metereológica única. Em 8660 registros horários de temperatura e umidade do ar em Serra Talhada no ano 2020 nunca houve um só registro com umidade 80% e temperatura 28°C, ou seja, a capacidade deste equipamento não seria atendida em nenhum dia do ano de 2020, uma vez instalada em Serra Talhada.

Conclusões que são possíveis de tirar com base na análise do gráfico da energia requerida, média dos registros horários do mês, por litro de água produzido (Whl^{-1}). Usando como exemplo o município de Arcoverde, foi encontrada a maior energia requerida média 968,5Wh por litro no mês dezembro/2020 e a menor 685,7 Wh por litro no mês de maio/2020.

Primeiro caso, se o equipamento for dimensionado pela energia mínima, nos demais meses a energia requerida não será atingida e o volume de orvalho não será o projetado. Isso não pode ser evidenciado depois do equipamento comprado e instalado, isso precisa ser discutido no ato da negociação.

No segundo caso, se o equipamento for dimensionado pela maior energia requerida o investimento poderá inviabilizar o projeto e ainda, não havendo a inteligência no sistema o volume de condensado poderá ser prejudicado, haverá o risco de congelar a água do orvalho no evaporador (parte fria) do equipamento e novamente não se atingir o condensado do projeto.

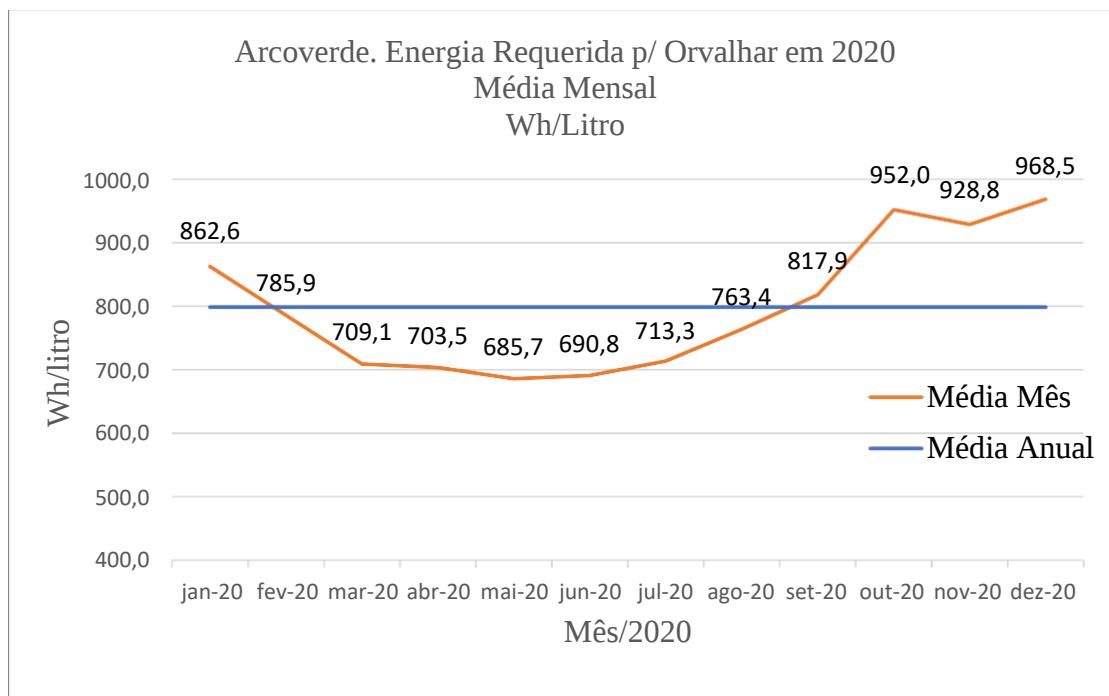
Nos meses onde o equipamento estará super dimensionado para a energia requerida, haverá um consumo de energia elétrica maior, quando comparado a uma especificação adequada aos meses de dimensionamento apropriado à energia requerida.

No terceiro momento e a pior hipótese será uma aquisição e instalação de um equipamento sem conhecer o perfil da energia requerida.

A forma inteligente para o dimensionamento em Arcoverde, como exemplo, será adotar um investimento que contemple a automação. O projeto do equipamento calcula a energia requerida e modula as variáveis para que se consiga atingir a energia requerida de forma automática, garantindo o volume desejado durante todo o período programado à produção, com o menor consumo de energia.

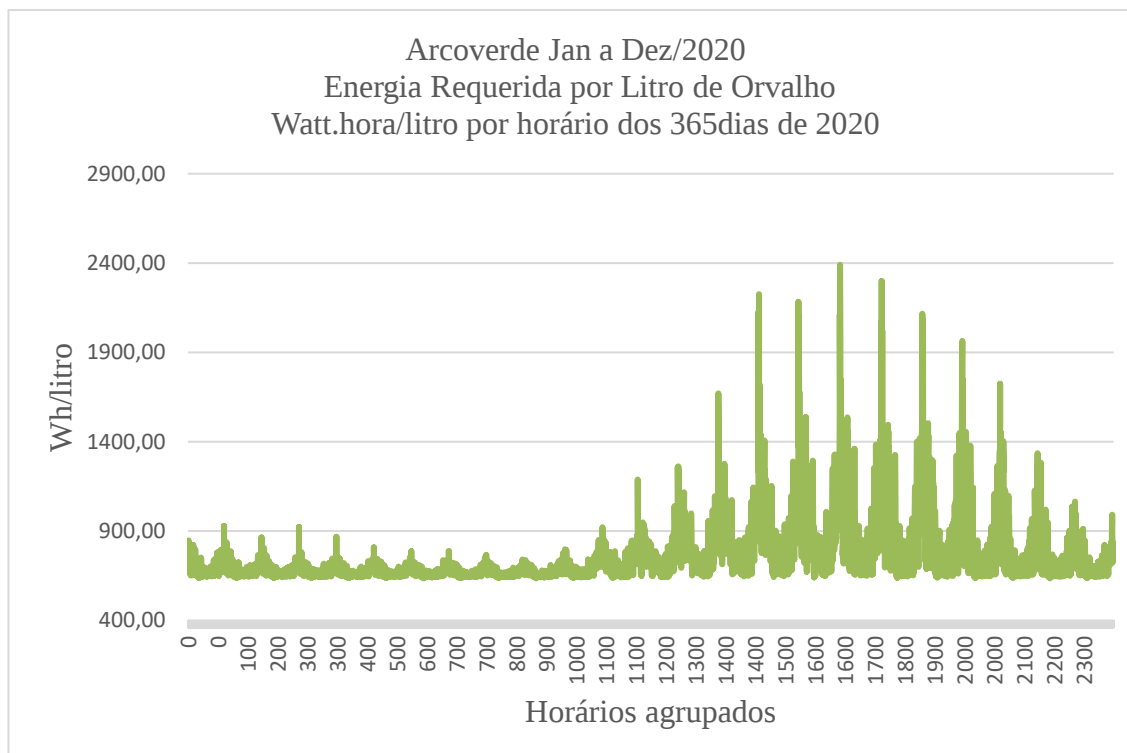
Como solução ainda mais racional para dimensionar um equipamento desta natureza será conhecer o perfil de energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1})¹⁾ agrupado por horário do dia, identificando os horários de menor e maior energia requerida.

Figura 52: Média dos registros horários do mês da energia requerida por litro de água produzido (Whl^{-1}) em Arcoverde.



Fonte: Autor, (2021).

Figura 53: Perfil de energia requerida (Whl^{-1}) agrupado por horário do dia identificando os horários de menor e maior energia requerida em Arcoverde.



Fonte: Autor, (2021).

Analisando a Figura 53 é possível visualizar um perfil energético de orvalho de baixa energia requerida nos horário de 23:00 às 10:00. Considerando este período o dimensionamento será econômico, e o volume de orvalho será o desejado. Obviamente só será possível uma definição desta natureza, se e somente se, existir o perfil de energia requerida traçado.

Este tipo de gráfico tem especial aplicação para projetos desenvolvidos com energia fotovoltaica. No dimensionamento das placas fotovoltaicas, banco de baterias, carregador de bateria e conversor, a quantidade de horas trabalhadas por dia e quais horários do dia estarão em funcionamento, são de fundamental importância para um acionamento por energia solar. Se a decisão for trabalhar todos os dia em todas as hora, com a garantia do volume de condensado almejado, o equipamento terá de ser dimensionado pela maior energia requerida, e o sistema de energia solar também estará super dimensionado gerando investimentos que podem inviabilizar o projeto e consequentemente a aquisição do equipamento.

A metodologia e o dispositivo para determinar o perfil da energia requerida à produção de água do orvalho em qualquer localidade, permitem o dimensionamento e lógica de operação dos equipamentos sem gerar impactos ambientais. Fornece dados para as instalações, disponibiliza perfil horário de operação para especificação do acionamento

por energia fotovoltaica e promove a previsão dos custos de operação com consumo de energia elétrica. Este trabalho disponibiliza o conhecimento técnico e operacional necessários às negociações com fornecedores de equipamentos e dimensionamento de usinas de produção de água do orvalho em um processo ambientalmente correto.

Por fim, a pesquisa oferece uma alternativa sustentável para minimizar a escassez de água apropriada ao consumo humano.

7 - Referências.

ARAÚJO, J. PESSOA. **Modelagem e Controle de uma Planta de Dessalinização por Osmose Reversa**. Universidade Federal do Ceará Centro de Tecnologia Departamento de Engenharia Elétrica Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Fortaleza 2018. Dissertação p. 17

BATISTA, LARISSA; MENDONÇA, ROGETE, VALE, CLÁUDIA. **Avaliação de Parâmetros de Qualidade da Água para Consumo Humano dos Campi do IFAM**, Manaus, 2019. Capítulo 5.4, p.140.

COUTINHO DE PAULA, EDUARDO. **Avaliação Técnica e Ambiental da Reciclagem Via Oxidação Química de Membranas de Osmose Inversa Descartadas**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte 2017. Tese doutorado p. 2.

DAVID L. CHANDLER. **Turning desalination waste into a useful resource**. Massachusetts Institute of Technology, MIT News, February 13, 2019 <https://news.mit.edu/2019/brine-desalination-waste-sodium-hydroxide-0213>

FERNANDO LANG DA SILVEIRA. **A Física no Salto Recorde de Felix Baumgartner**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 37, n. 2, 2306 (2015), Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, p. 2306-2, 2015.

GRECCO, FELIPE; CORÁ, MARISA; SOARES, JEFERSON; WIDERSKI, ROBERTO. **Coletor de Orvalho Warkawater: sua Aplicabilidade e Exploração de uma Fonte de Água Alternativa**. ENGEMA – Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. 2016. P.2, p.4.

LARISSA CAROLINA CORRAIDE DA SILVA. **Captação de Água da Atmosfera – Análise do Potencial Brasileiro e Desenvolvimento de Protótipos**. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2018. Dissertação p.90.

LAWRENCE, MARK G. **The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air**. American Meteorological Society

LEOHBICALHO. **Graph of Dewpoint vs. Air Temperature at Varying Relative Humidities. Based on the Magnus-Tetens approximation.** Wikimedia. 2013.

LIMA, J. E. F. W. **Recursos Hídricos no Brasil e no Mundo, EMBRAPA Documentos 33**, Planaltina, DF 2001, p 10.

MALCORRA, M. P.; TRENTIN, GUSTAVO; BRACCINI, I. M. S.; YANGURDES, M. S. **Frequência de Ocorrência de Umidade Relativa do Ar acima de 90% na Região da Campanha.** XXX Jornada Acadêmica Integrada - JAI Universidade Federal de Santa Mara, 19 e 23 de Outubro, 2015

MIRANDA, JARBAS H.; LIBARD, PAULO L.; LIER QUIRIJN J.; MORAES, SERGIO O. **Física do Ambiente Agrícola**, Escola Superior de Agricultura Universidade de São Paulo, 2015, capítulo 6, p.4.

MINISTÉRIO DE DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Programa Água Doce conclui repasse de recursos para Pernambuco**, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/programa-agua-doce-conclui-repasse-de-recursos-para-pernambuco>.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria nº 2.914, Padrão de Potabilidade, Capítulo 5, Art. 39, Parágrafo 1º**, Brasília, 2011.

OMS E UNICEF. **Estimativas Globais de Água, Saneamento e Higiene para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**, Genebra / Nova York, 2017. Disponível em: <https://www.unicef.org/angola/comunicados-de-imprensa/21-bilh%C3%B5es-de-pessoas-n%C3%A3o-t%C3%AAm-acesso-%C3%A1-gua-pot%C3%A1vel-em-casa-e-mais-do-dobro>

PAZ, ADRIANO. **Hidrologia Aplicada**. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Caxias do Sul, 2004. Capítulo 2, p. 8. Disponível em: https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/03/aula1_apostila_hidrologia_aplicada_uergs.pdf

RED MADRILEÑA DE TRATAMIENTOS AVANZADOS PARA AGUAS RESIDUALES REMTAVARES. **Membranas de Ósmosis Inversa: del residuo al recurso**, 2015. Disponível: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2015/02/13/132095>

SANTOS, B. SÉRGIO; SAMUELSON, EVELIN. **Importância da Análise Físico-Química da Água Mineral**. Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente – FAEMA, 2022

SILVA, GENIVAL. **Condensação da Umidade Atmosférica: um Estudo da Viabilidade da Produção de Orvalho por Resfriamento do ar nos Municípios Paraibanos de Campina Grande e São João do Cariri**. Universidade Federal de Campina Grande. Março, 2007.

SILVEIRA, F. LANG. **(Centro de Referência para o Ensino de Física). Eletricidade, Máquinas Térmicas, Termologia, termodinâmica.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2018. Disponível em: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=duvida-recorrente-sobre-potencia-de-condicionadores-de-ar>

SILVEIRA, FERNANDO. **Determinando a Umidade Absoluta do Ar a Partir da Umidade Relativa.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/328049550>

SHIKLOMANOV, I.A.; RODDA JOHN C. **World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century.** Cambridge University, United Kingdom, 2004. Capítulo 1, p.13; p.17

UNICEF E OMS. **Relatório Sobre Diarreia, a Segunda Maior Causa de Mortalidade Infantil no Mundo,** 2009. Disponível em: <https://www.unicef.org/brazil/sites/unicef.org.brazil/files/2019-03/UNI17.pdf>

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation WMO-No. 8 Seventh edition.** Genebra. Capítulo 4, anexo 4.A, p.1.4-26, item 3, 2008.