

ANDERSON MIGUEL LENZ

**USO DA ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE
ÁGUA E MICROGERAÇÃO DE ELETRICIDADE
VISANDO A SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA DE
UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR RURAL**

**CASCVEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2016**

ANDERSON MIGUEL LENZ

**USO DA ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE
ÁGUA E MICROGERAÇÃO DE ELETRICIDADE
VISANDO A SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA DE
UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR RURAL**

Dissertação apresentada a Universidade Estadual do Oeste do Paraná como parte das exigências como parte das exigências do programa de Pós graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de mestre.

Orientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

Coorientador 1: Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

Coorientador 2: Dr. Estor Gnoatto.

**CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2016**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

L59u Lenz, Anderson Miguel
Uso da energia solar para aquecimento de água e microgeração de eletricidade visando a sustentabilidade energética de uma residência unifamiliar rural./Anderson Miguel Lenz. Cascavel, 2016.
91 p.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Coorientador: Prof. Dr. Estor Gnoatto

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2016
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura

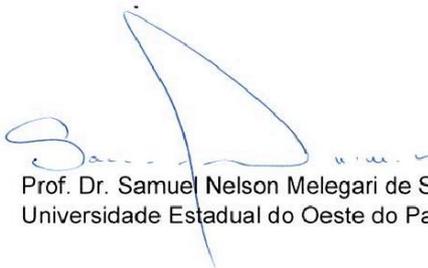
1.Termossolar. 2. Eficiência. 3. Desempenho. 4. Fotovoltaico. 5. Resfriamento. 6. Energia solar. 7. Energia elétrica. 8. Energia térmica. 9. Residência rural. I.Souza, Samuel Nelson Melegari de. II. Nogueira, Carlos Eduardo Camargo. III. Gnoatto, Estor. IV. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. V. Título.

CDD 22.ed. 621.473

ANDERSON MIGUEL LENZ

**“USO DA ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA E
MICROGERAÇÃO DE ELETRICIDADE VISANDO A
SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA DE UMA RESIDÊNCIA
UNIFAMILIAR RURAL”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:



Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Flavio Gurgacz
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Profa. Dra. Cristiane Lionço Zeferino
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Medianeira

Cascavel, 15 de fevereiro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de uma forma ou de outra contribuíram para execução deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza pelas suas precisas e eficazes orientações.

Agradeço aos professores do programa Dr. Flavio Gurgacz e Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira pelo apoio nas mais diversas horas.

Aos professores Dr. Estor Gnoatto e Msc. Yuri Ferruzzi pelas preciosas dicas técnicas sobre a execução da parte técnica do trabalho.

A secretária Vanderléia L. S. Schmidt pelo auxílio nas mais diversas horas.

A professora Cristiane Lionço Zeferino por ter aceitado ser membro externo da minha defesa.

Agradeço a Capes pela bolsa de estudos que me permitiu dedicação integral a pesquisa.

“As oportunidades normalmente se apresentam disfarçadas de trabalho árduo, e é por isso que muitos não as reconhecem.” Ann Landers.

LENZ, Anderson Miguel. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Fevereiro 2016. **USO DA ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA E MICROGERAÇÃO DE ELETRICIDADE VISANDO A SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA DE UMA RESIDENCIA UNIFAMILIAR RURAL.** Samuel Nelson Melegari de Souza.

RESUMO

Tendo em vista que o consumo energético dos sistemas de aquecimento de água residenciais por chuveiros representa 24% do consumo de energia elétrica residencial, e que as residências correspondem a 27% do consumo de energia elétrica total no Brasil, visando minimizar este consumo, uma das alternativas mais sustentáveis é o uso de sistemas de aquecimento utilizando placas termossolares. Neste trabalho buscou-se avaliar durante o período de um ano desempenho de um sistema de aquecimento termossolar de 1 m² de área, utilizando materiais comumente encontrados em construção civil. A unidade de medida utilizada para mensurar a quantidade de energia absorvida pelo sistema foi o W(watt), mesma unidade de consumo dos chuveiros visando facilitar o seu dimensionamento. Dentro dos resultados observa-se que ao longo de um ano a eficiência média mensal variou de 33,7% a 53,54%, e eficiência média ficou em 45,9%, e ao longo deste período o sistema absorveu 695.394 Wh de energia térmica, indicando o montante de energia elétrica que pode ser economizada ao utilizar um sistema de aquecimento de água termossolar em vez de chuveiros. O sistema foi considerado adequado para o uso de aquecimento de água em residências, pois a sua eficiência ficou dentro dos mesmos níveis obtidos com placas fabricadas industrialmente. Painéis solares fotovoltaicos podem ser utilizados tanto para eletrificação rural em sistemas isolados, quanto serem usados conectados a rede de energia elétrica. Em ambos os casos um dos fatores que mais limita a eficiência do conjunto é a temperatura do painel, pois aumenta a sua resistência interna e por consequência gera perdas de energia. Visando minimizar este efeito montou-se um sistema de resfriamento na parte inferior do painel com aspersão de água, para avaliar o efeito do resfriamento sobre as características de desempenho do painel como corrente, tensão, potência e eficiência. O desempenho do painel foi monitorado em três períodos distintos, o 1º com resfriamento intermitente, o 2º sem resfriamento e o 3º com resfriamento contínuo nas horas mais quentes do dia. As análises foram feitas sobre dois níveis de irradiação, o nível alto diz respeito aos níveis mais próximos do máximo que ocorre em um dia de céu limpo, em torno de 1000 W/m², e o nível baixo foi definido como 700 W/m² que é um dos níveis de maior ocorrência. Dentro da análise dos dados observou-se que o uso do resfriamento para um nível alto de irradiação solar a potência aumentou 12,26% e a eficiência 12,17% em relação ao não resfriado, e para o nível baixo de irradiação a potência aumentou 8,48% e a eficiência 9,09% em relação ao não resfriado. Conclui-se que o sistema foi eficaz em aumentar o desempenho do painel e que pode ser utilizado para incrementar a eficiência em sistemas isolados como em sistemas conectados a rede. Neste trabalho estudou-se o desempenho técnico de duas tecnologias de conversão de energia solar em energia útil, energia térmica no caso dos painéis termossolares, e energia elétrica com painéis fotovoltaicos, que podem ser utilizadas para auxiliar o suprimento das necessidades energéticas de uma residência unifamiliar rural bem como em residências urbanas. As informações técnicas de desempenho coletadas podem servir de incentivo para novos empreendimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Termossolar, Eficiência, Desempenho, Fotovoltaico, Resfriamento, Energia solar, Energia Elétrica, Energia Térmica, Residência Rural.

LENZ, Anderson Miguel. State University of West Paraná, February 2016. **USE OF SOLAR ENERGY FOR WATER HEATING AND ELECTRICITY MICROGENERATION AIMING AT ENERGY SUSTAINABILITY OF A RESIDENCE SINGLE FAMILY RURAL.** Samuel Nelson Melegari de Souza.

ABSTRACT

Considering that the energy consumption of residential water heating systems by showers represents 24% of household electricity consumption, and households account for 27% of total electricity consumption in Brazil in order to minimize this consumption, one of the most sustainable alternatives is the use of heating systems using thermosolar plates. This work aimed to evaluate during the period of one year performance of a thermosolar heating system of 1 m² in size, using commonly found materials in civil construction. The unit of measurement used to measure the amount of energy absorbed by the system is the W (watt), the same unit of consumption of the showers to facilitate your sizing. Inside the results it can be observed that along one year, the monthly average efficiency ranged from 33.7% will be 53.54%, and average efficiency was 45.9%, and over this period the system absorbed 695 394 Wh Thermal energy, indicating the amount of electric energy that can be saved by using a thermosolar water heating system instead of showers. The system was considered suitable for use in water heating in residences because their efficiency was within the same levels obtained with plates manufactured industrially. Photovoltaic solar panels can be used both for rural electrification in isolated systems, as they are used connected to the power grid. In both cases one of the factors that most limits the overall efficiency is the panel temperature, because it increases its internal resistance and therefore generates energy losses. To minimize this effect was mounted a cooling system in the bottom of the panel with water spray, to assess the cooling effect on the panel performance characteristics as current, voltage, power and efficiency. The performance of the panel was monitored in three different periods, the 1st with intermittent cooling, without cooling the 2nd and 3rd with cooling continued in the hottest hours of the day. The analyzes were performed on two levels of irradiation, the high level with respect to levels closer to the maximum occurring on a clear day, around 1000 W / m², and the lower level was set to 700 W / m² that it is one of the largest occurrence levels. Within the analysis of the data it was observed that the use of cooling for a high level of solar irradiation power increased by 12.26% and 12.17% efficiency at not cooled, and the low irradiation power increased by 8.48% and 9.09% efficiency compared to not be cooled. It is concluded that the system was effective in boosting the performance of the panel and can be used to increase efficiency in isolated systems as in the network connected systems. In this work we studied the technical performance of two solar energy conversion technologies into useful energy, thermal energy in the case of thermosolar panels and electric energy with photovoltaic panels, which can be used to help supply the energy needs of a single family residence rural as well as urban households. The collected performance technical information can provide an incentive for new ventures.

KEYWORDS: Thermosolar, Efficiency, Performance, Photovoltaic, Cooling, Solar Energy, Electric Power, Thermal Energy, Rural Residence.

ÍNDICE

CAPITULO 1 – USO DA ENERGIA SOLAR TERMOSSOLAR PARA O AQUECIMENTO DE ÁGUA EM UMA RESIDENCIA UNIFAMILIAR RURAL.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 A ENERGIA SOLAR.....	3
1.2 POTENCIAL SOLAR BRASILEIRO.....	5
1.3 APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR.....	6
1.3.1 Classificação formas de aproveitamento da energia solar.....	6
1.4 TIPOS DE COLETORES.....	7
1.4.1 Coletor solar plano aberto.....	7
1.4.2 Coletor solar plano fechado.....	7
1.4.3 Coletor solar de tubo evacuado.....	9
1.5 DESEMPENHO DOS COLETORES TERMOSSOLARES DE USO RESIDENCIAL.....	10
1.6 SISTEMAS DE AQUECIMENTO RESIDENCIAL SOLAR DE ÁGUA.....	11
1.6.1 Sistema termossifão tradicional.....	11
1.6.2 Sistema com resistência auxiliar.....	12
1.6.3 Sistema chuveiro “inteligente”.....	13
1.7 PAINÉIS TERMOSOLARES NO CONTEXTO INTERNACIONAL.....	14
1.8 USO RURAL E BENEFICOS DO USO DE SISTEMA DE AQUECIMENTO DE AGUA TERMOSSOLAR.....	16
1.9 OBEJETIVO.....	16
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	17
2.1 COLETOR SOLAR PLANO.....	17
2.2 COLETA DOS DADOS.....	19
2.3 ANÁLISE DO DESEMPENHO.....	21
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4 CONCLUSÃO.....	26
5 REFERÊNCIAS.....	27
CAPITULO 2 – DESEMPENHO E EFEITO DO RESFRIAMENTO SOBRE UM SISTEMA DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA DE 66W VISANDO A SUSTENTABILIDADE ENERGETICA RURAL OU URBANA.....	31
1 INTRODUÇÃO.....	31
1.2 TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR EM ELÉTRICA EXISTETENTES EM OPERAÇÃO.....	34
1.2.1 Energia Solar Concentrada.....	34
1.2.2 Energia Solar Fotovoltaica.....	36
1.2.2.1 Sistemas de geração de energia elétrica fotovoltaico.....	38
1.2.2.2 Sistemas isolados.....	38
1.2.2.3 Sistemas conectados a rede.....	40
1.3 DINÂMICA DOS FLUXOS DE ENERGIA ENTRE UNIDADE CONSUMIDORA/GERADORA E REDE DA CONCESSIONARIA.....	41

1.4 REGULAMENTAÇÃO.....	42
1.5 POTENCIAL FOTOVOLTAICO DISTRIBUÍDO RESIDENCIAL BRASILEIRO.....	44
1.6 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS.....	46
1.7 EFEITO IRRADIAÇÃO SOLAR.....	47
1.8 EFEITO DA TEMPERATURA.....	48
1.9 EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	49
1.10 OBJETIVO.....	51
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
2.1 MATERIAIS.....	52
2.1.1 Delineamento da coleta do efeito do resfriamento sobre o desempenho sobre um conjunto de painéis conectado a rede interna de uma residência:.....	52
2.1.1.1 Período 1. Período de coleta com resfriamento intermitente programado.....	52
2.1.1.2 Período 2. Período de coleta sem nenhum tipo de resfriamento.....	53
2.1.1.3 Período 3. Período de coleta com resfriamento contínuo das 10:00hs as 18:00hs.....	53
2.1.2 Dados coletados.....	53
2.1.3 Conjunto de painéis fotovoltaicos.....	53
2.1.4 Sistema de resfriamento.....	55
2.1.5 Inversor de Grid-Tie.....	55
2.1.6 Piranômetro.....	56
2.1.7 Medições de temperatura.....	57
2.1.8 Datalogger cr1000.....	58
2.1.9 Câmera térmica.....	58
2.2 MÉTODOS.....	59
2.2.1 Montagem do experimento para coleta dos dados.....	59
2.2.2 Delineamento da frequência de coleta.....	60
2.3 CÁLCULOS EFETUADOS.....	60
2.3.1 Parâmetros calculados para análise:.....	61
2.4 MÉTODOS DE ANÁLISE DOS DADOS.....	62
2.4.1 Coeficiente de correlação de Pearson.....	64
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
3.1 IMAGENS TÉRMICAS.....	65
3.2 RESULTADO DOS TRATAMENTOS.....	67
3.3 INTERAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS ANALISADAS E OS NÍVEIS CRESCENTES DE IRRADIAÇÃO.....	70
4 CONCLUSÃO.....	74
5 REFERÊNCIAS.....	75
ANEXO A. RESULTADOS COMPLETOS DOS TESTES ESTATÍSTICOS.....	79

CAPITULO 1 – USO DA ENERGIA SOLAR TERMOSSOLAR PARA O AQUECIMENTO DE ÁGUA EM UMA RESIDENCIA UNIFAMILIAR RURAL

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica residencial no Brasil correspondeu a aproximadamente 27% do consumo total de energia em 2013, (EPE, 2014). Dentro do consumo energético total das residências no Brasil o chuveiro elétrico detém a maior participação dentre os usos finais. Consumindo em torno de 24% da energia elétrica (ELETROBRÁS, PROCEL, 2012), a maior parte da energia elétrica para aquecimento é consumida no horário de pico das 18h as 20h, momento do dia caracterizado pelo fim do expediente, e período do acionamento da iluminação pública, acionamento dos eletrodomésticos, do chuveiro, do ar condicionado, o que impõe uma enorme pressão sobre o Sistema Interligado Nacional (SIN) (EPE, 2011).

Na Figura 1 é possível visualizar a composição da curva de consumo de energia elétrica de uma residência comum ao longo do dia, observa-se que o chuveiro é o equipamento que possui maior área e por consequente maior consumo. Assim medidas que visem à diminuição do seu consumo serão de grande influência sobre o consumo residencial. Além da diminuição do gasto familiar com o aquecimento de água, irá proporcionar diminuição da demanda de energia elétrica proveniente do SIN.

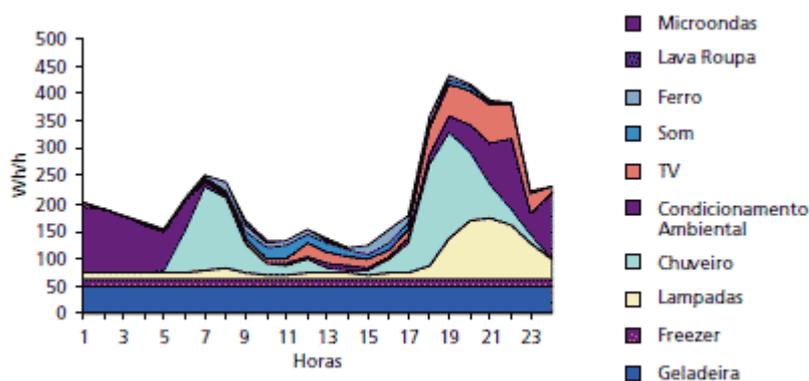


Figura 1. Curva de carga média residencial Brasileira.

Fonte: ELETROBRAS (2009).

Segundo dados da EPE (2014), no ano de 2013 cerca de 68,6% da energia gerada no Brasil foi proveniente usinas hidroelétricas como visualizado na Figura 2, estas estão sujeitas a ter seu potencial de geração diretamente afetado pela variação dos ciclos das chuvas ou variações climáticas, por utilizar na geração de energia, água da chuva armazenada nos

reservatórios, ou seja a nossa matriz energética é extremamente vulnerável à variação do clima, assim uma eventual variação climática como secas plurianuais pode afetar a capacidade das usinas geradoras no atendimento a demanda de energia elétrica, (SCHAEFFER E COHEN, 2007). Esta situação obriga o acionamento das termelétricas a gás natural que hoje já correspondem a 12,1% da energia gerada no Brasil (EPE, 2014), sem considerar os 2,6% de nuclear, 2,6% de carvão e 3,9% de derivados de petróleo, que além de não renováveis são as grandes responsáveis pela poluição do ar e meio ambiente. (SOUZA, Ozair et al .2012).

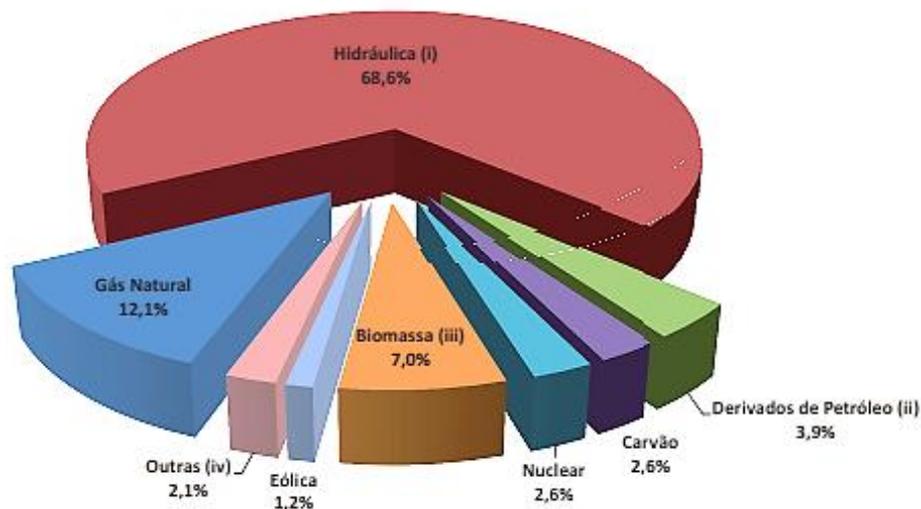


Figura 2. Geração de Energia Elétrica por fonte no Brasil – participação em 2013

Fonte: (EPE, 2014)

Vale destacar que o Brasil é um dos poucos países que possui uma matriz energética majoritariamente hidroelétrica, proporcionado por suas características climáticas extremamente favoráveis para formação de grandes rios, além de que grande parte do relevo é acidentado, diminuindo a área alagada necessária para atingir um maior potencial. Apesar de estiagens eventuais, ainda assim o Brasil é um dos países com maior riqueza em energias renováveis.

Em anos de estiagem, o potencial hidroelétrico é diminuído, fazendo com que seja necessário buscar outras fontes de energia, no caso do Brasil a fonte mais utilizada nestes momentos é a termelétrica, que tem um alto custo de produção de energia, além de gerar uma alta poluição do ar atmosférico. Com intuito de reduzir a necessidade de se utilizar as termelétricas, e reduzir a vulnerabilidade do sistema elétrico às variações climáticas vem se adotando o uso de fontes alternativas de energia como a solar, que pode ser utilizado de várias

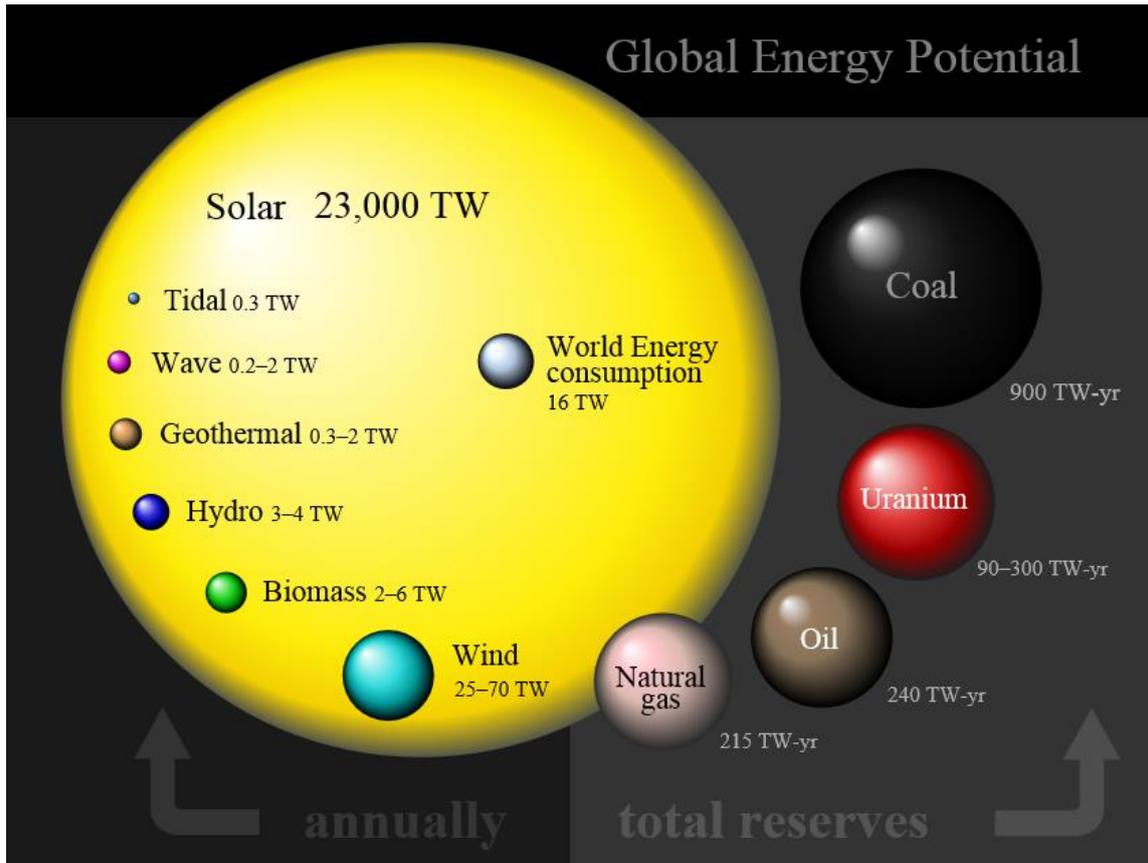
formas, mas em geral pode classificar em duas formas à ativa, ou a passiva. Na passiva a energia é utilizada no aquecimento e iluminação de ambientes, na ativa ela se divide em solar fotovoltaica e solar térmica (TOLMASQUIM, 2003).

A energia solar pode ser aproveitada nas mais variadas formas para satisfazer as necessidades humanas. No aproveitamento direto ou ativo a irradiação solar atua como fonte de energia térmica direta para o aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica e/ou elétrica. Esta ainda pode ser convertida diretamente em energia elétrica, pelo efeito sobre determinados materiais chamados semicondutores, utilizando-se dos efeitos termoeletrônicos e fotovoltaicos.

1.1 A ENERGIA SOLAR

Para compreender o quão importante é a energia solar, é preciso conhecer a sua abundância energética. Sabe-se que em um dia a radiação solar que atinge a terra é muito maior que toda a energia que a espécie humana utiliza em um único ano, para ser mais específico, em um ano essa energia que atinge a terra proveniente do sol é estimada em 885 milhões de Terawatthora (TWh), isto equivale a quase 6200 vezes mais a quantidade de energia que a demanda total de energia em 2008 (142 712 (TWh)). Considerando ainda o estoque total de combustíveis fósseis (combinando carvão, petróleo e gás natural) equivale a apenas 254 anos na atual taxa de demanda como visualizado na Figura 3, caso a energia solar que atinge o sol em único ano pudesse ser capturada e armazenada forneceria energia por mais de 6000 anos (Desertec, 2009). (IEA, 2011).

Claramente esta energia não pode ser aproveitada integralmente, mas chama atenção para aproveitamento deste recurso energético nas regiões que apresentam uma maior abundância deste recurso, além de que para ter sustentabilidade energética no futuro deve-se desenvolver tecnologias relacionadas a este recurso, como é o caso do aproveitamento da biomassa, energia eólica e a energia solar térmica, concentrada e fotovoltaica. Todas estas fontes já possuem tecnologias para seu aproveitamento, mas há muito mais a ser aprimorado.



Tradução: *Global Energy Potential*: Potencial de Energia Global. *Solar*: Solar; *Tidal*: Marés; *Wave*: Energia das ondas do mar; *Geothermal*: Geotérmica; *Hydro*: Hidráulica; *Biomass*: Biomassa; *Wind*: Vento; *World Energy consumption*: Consumo de energia mundial; *Annually*: Anualmente; *Coal*: Carvão; *Uranium*: Urânio; *Oil*: Petróleo; *Natural Gas*: Gás natural. *Total Reserves*: Reservas Totais.

Figura 3. Potenciais de energia mundial.

Fonte: IEA (2011).

Sem dúvida a fonte de energia que predomina e comanda os fenômenos na terra é a energia solar. Assim sem sombra de dúvida dentre as possíveis formas de energia que o homem conhece a que tem o maior potencial de gerar o suprimento de energia para humanidade é a solar, mas o grande desafio é desenvolver tecnologias que substituam a atual matriz energética fóssil para a matriz renovável solar. Um dos problemas da energia solar é a dificuldade em que esta tem de ser estocada como as energias fósseis, por exemplo, um litro de gasolina possui 35MJ de energia a pronta disposição para dispendir essa energia para gerar trabalho útil, esta mesma quantia de energia é absorvida por um metro quadrado de painel solar em condições ótimas, ou seja, com céu limpo durante 10 horas. Sua capacidade de estocagem no caso de armazenamento em forma de energia térmica no reservatório de água

quente é limitada á poucas horas (IEA, 2010) por mais isolado do ambiente que seja o reservatório o calor absorvido será perdido. Neste aspecto crescem outras formas de aproveitamento da energia solar como o caso da biomassa mais específico os biocombustíveis, que pode ser armazenada e consumida a qualquer instante que desejar (respeitando os limites de degradação do biocombustível), assim este é a tecnologia que no momento tem a possibilidade de substituir os combustíveis fósseis.

1.2 POTENCIAL SOLAR BRASILEIRO

Na Figura 4 é possível visualizar que o país como um todo possui uma grande quantidade de energia disponível a partir da irradiação do sol no ano todo, onde esta energia é gratuita. As regiões de maior potencial se localizam no interior do estado da Bahia, e os menores potenciais na região costeira dos estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina.

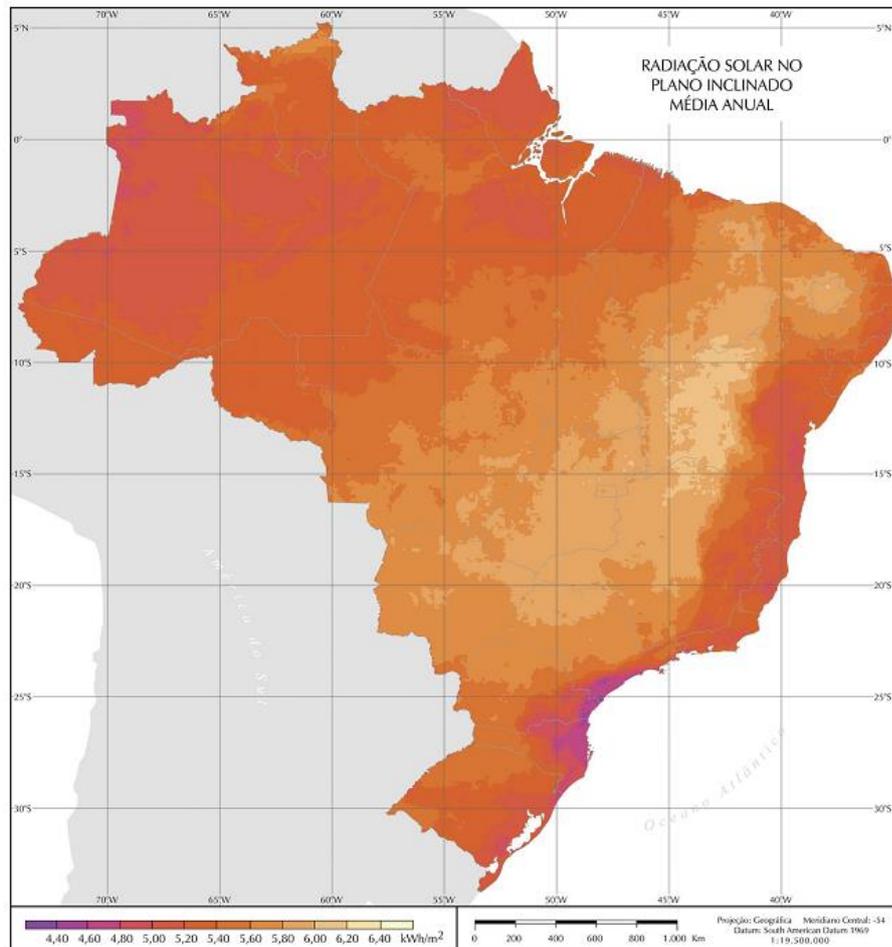


Figura 4. Radiação solar no plano inclinado médio anual.

Fonte: Atlas do potencial solar brasileiro. 2006

O Brasil está entre os países que têm maior potencial de energia proveniente da radiação luminosa do sol, analisando o seu território como um todo, por possuir uma alta quantidade de irradiação solar em quase todo seu território. (CEPEL, 2001). Apesar deste enorme potencial energético este é muito pouco aproveitado, se comparada, por exemplo, a alguns países desenvolvidos como os da Europa como a Alemanha, onde a energia média anual diária disponível na região de menor potencial é de 0,9 e na de maior é de 1,25kWh/m² dia, França (0,9-1,65kWh/m² dia) e Espanha (1,2-1,85 kWh/m² dia) muito inferiores a regiões de menor potencial do Brasil com (4,2 – 6,7kWh/m² dia) estes países aproveitam mais intensamente esta energia (PEREIRA, 2006).

1.3 APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR

1.3.1 Classificação formas de aproveitamento da energia solar

Dentro de todas as formas de aproveitamento da energia solar visualizadas na Figura 5, neste trabalho serão aprofundados os temas relacionados ao seu uso para aquecimento de água, e para geração de energia solar fotovoltaica conectada a rede.

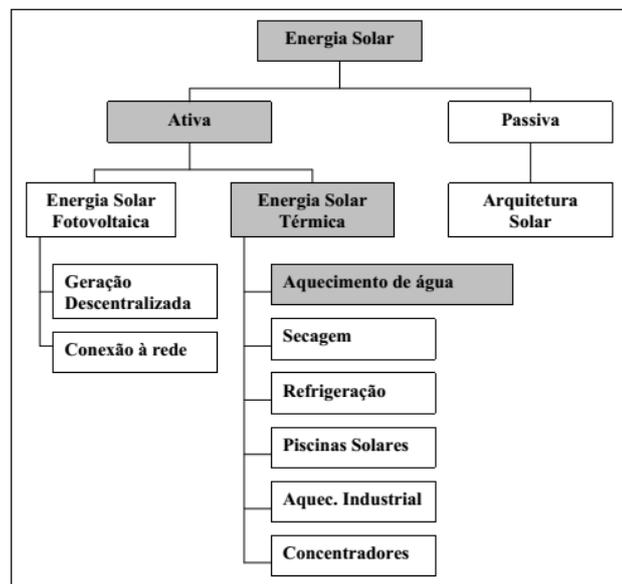


Figura 5. Classificação dos tipos de aproveitamento da energia solar.

Fonte: Pereira et al., 2003.

1.4 TIPOS DE COLETORES

1.4.1 Coletor solar plano aberto

São comumente utilizados para aquecimento de piscinas e operam bem em Baixa temperatura, em torno de 28 e 30°C. Não possuem uma cobertura transparente, nem algum tipo de isolamento térmico, o corpo do coletor é feito com materiais termoplásticos mostrado na Figura 6, polipropileno, EPDM ou borrachas especiais, o seu mercado é muito incipiente no Brasil, mas é muito utilizado nos EUA (PEREIRA et al, 2003).



Figura 6. Coletor solar plano aberto.

Fonte: HELIOTEC (2006).

1.4.2 Coletor solar plano fechado

São coletores utilizados para aquecer a água até uma temperatura média de 60°C e proporcionar o condicionamento ambiental para uma melhor transferência do calor da energia solar para a água. Um coletor solar plano fechado é constituído basicamente por 5 elementos principais característicos como ilustrado na Figura 7, onde o desempenho pode variar de acordo com o material utilizado em cada elemento.

1° Cobertura transparente: (Composta por vidro) Cobertura transparente e um sistema de vedação, que produz um efeito semelhante a nossa atmosfera o “efeito estufa” (PRADO, 2007), que faz com que os raios solares entrem e tenha uma maior dificuldade ao sair. Além de evitar a troca de calor da placa com ar ambiente, assim garantindo uma maior eficiência de conversão da energia solar em energia térmica.

2° Placa absorvedora: (Aletas de cobre) Placa absorvedora pintada de preto fosca para melhor absorção da energia solar para transferência a tubulação por onde circula o fluido a ser aquecido.

3° Tubulação: (Tubos de cobre) Tubulação interna para o escoamento do fluido a ser aquecido pelo interior da placa coletora.

4° Isolamento Térmico: Visando o isolamento que o calor do sol irradia para dentro da placa não seja trocado com o ambiente na parte inferior da placa.

5° Caixa estrutural: Uma caixa externa para dar estrutura para todos os outros elementos do coletor.

A vista explodida da caixa contendo todos os componentes é visualizada na Figura 7.

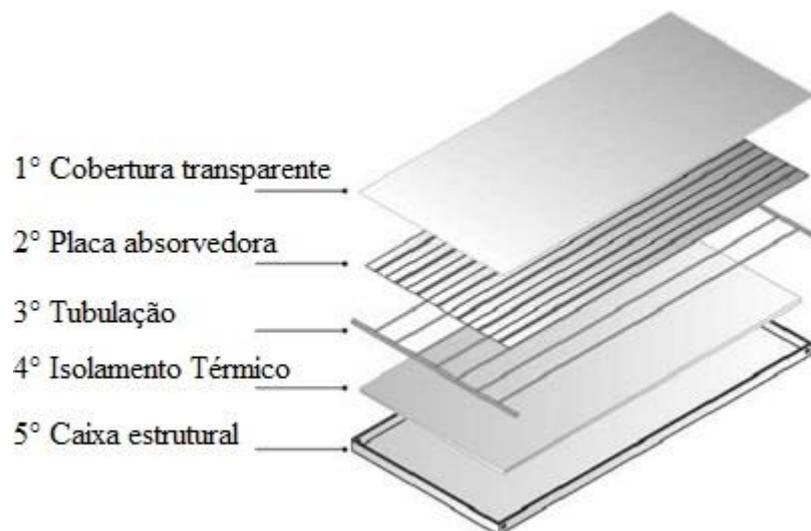


Figura 7. Coletor solar plano fechado.

Fonte: Adaptado de HELIOTEK, (2006).

Em geral os sistemas de aquecimento de água termosolar plano fechado apresentam uma eficiência muito boa para conversão da radiação solar em energia térmica, em avaliações realizadas em coletores solares planos no clima típico do hemisfério norte nas latitudes entre 40 e 60° a eficiência média fica entre 35-40% (German Solar Energy Society,2007). Em outro estudo realizado por (L.M. Ayompe, A. Duffy.2013), em Dublin, Ireland (latitude 53°20'N e longitude 6°15'), com uma coleta de dados em um painel termosolar de 4m², em um período de um ano, obteve eficiências variando de 39-55% de conversão.

1.4.3 Coletor solar de tubo evacuado

São coletores que com o objetivo de diminuir ainda mais as perdas, utilizam no seu interior vácuo (na ordem de 10^{-4} mmHg), e aumentar a eficiência e temperatura final da água (ENVIROFRIENDLY, 2005), em sua composição construtiva mais comumente utilizada é o do modelo de *water-in-glass* visto em corte na Figura 8. O sistema consiste em um tubo evacuado com dois tubos de vidro boro-silicato concêntricos, com suas extremidades inferiores fechadas. As bordas das pontas são seladas entre si e o vácuo só existe no espaço anular entre os dois tubos, o tubo interior é conectado diretamente ao reservatório. Uma bateira destes tubos (15 a 40) é conectada diretamente ao reservatório horizontal, com água circulando neste sistema por termosifão como ilustrado na Figura 8, na Figura 9 é visualizado um coletor deste modelo instalado no projeto CASA da Unioeste. (BUDIHardJO, 2009).

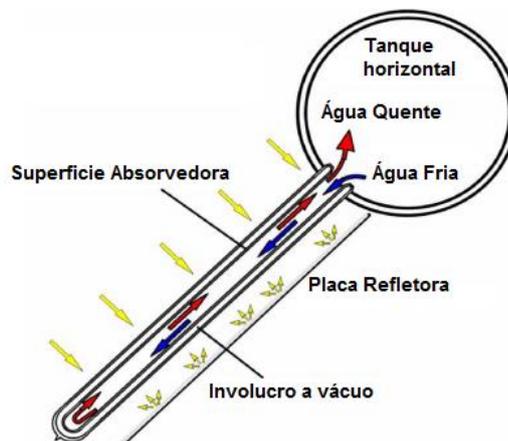


Figura 8. Aquecedor solar de água com tubos a vácuo tipo *water-in-glass*.

Fonte: Adaptado de (BUDIHardJO, 2009).



Figura 9. Coletor solar com tubos a vácuo tipo *all-glass* instalado na UNIOESTE, câmpus Cascavel

Este tipo de coletor é o mais utilizado na China, que é o país com maior potência e área instalada de coletores solares no mundo. Sua aplicação não se restringe somente ao aquecimento de água, devido a sua grande eficiência e a sua capacidade de gerar altas temperaturas, pode ser utilizado em pré-aquecimento industrial e refrigeração solar (ABRAVA, 2012) e (GOERCK, 2008).

1.5 DESEMPENHO DOS COLETORES TERMOSSOLARES DE USO RESIDENCIAL

Existem diversos tipos de coletores solares comerciais que podem ser utilizados para o aquecimento termossolar da água, na Figura 10 são mostradas as curvas de eficiência dos três tipos de coletores mais utilizados, onde se observa que o sistema de coletor aberto é mais indicado para aplicações de baixa temperatura em torno de 28 a 30°C, por ter eficiência superior a 60% neste nível de temperatura. O de coletor fechado para média temperatura até aproximadamente 80°C, e o coletor de tubo evacuado para altas temperaturas, podendo ser até utilizado para pré-aquecimento industrial. O que pode se afirmar a respeito do desempenho dos coletores a partir da eficiência é que não existe nenhum que seja ideal para todas as situações climáticas (temperatura ambiente alta ou baixa), por exemplo, se a necessidade de temperatura da água for baixa e as condições climáticas forem favoráveis (temperatura ambiente alta), um coletor solar aberto pode apresentar um ótimo desempenho (não haverá tanto potencial para perdas devido alta temperatura externa dispensando sistemas de isolamento), ou seja, consegue-se suprir a necessidade com menor custo.

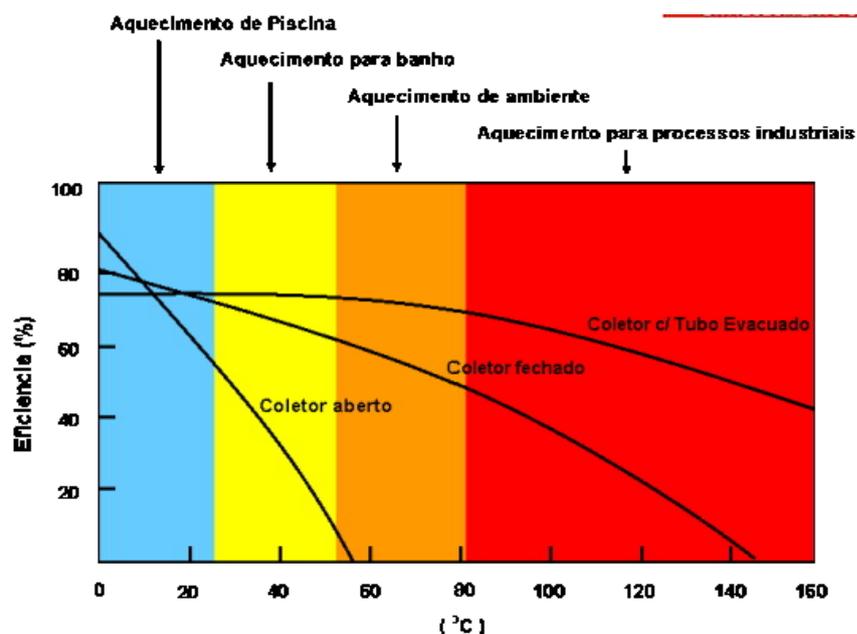


Figura 10. Curvas de rendimento para coletores solares de baixa e média temperatura. Fonte: Norton, 2006.

1.6 SISTEMAS DE AQUECIMENTO RESIDENCIAL SOLAR DE ÁGUA

1.6.1 Sistema termossifão tradicional

O sistema de aquecimento solar é dividido em três partes principais, subsistema de captação, sistema de armazenamento e sistema de consumo. O sistema de captação é composto pelos coletores solares, este é posicionado na parte externa da edificação no local que permita a melhor possibilidade de aproveitamento dos raios solares. O reservatório térmico é abastecido com água fria proveniente da rede de água, e assim este deve estar abaixo deste reservatório. Há casos em que é necessário um reservatório secundário para solucionar o problema da diferença de níveis.

A Figura 11 apresenta esquematicamente o funcionamento do sistema de aquecimento solar básico. MADEIRA (2013).

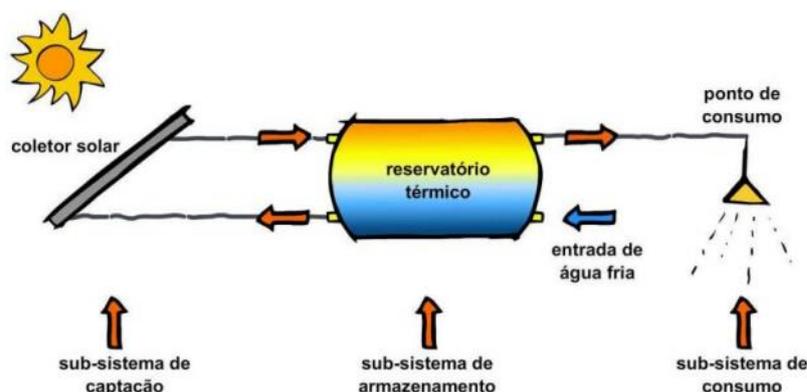


Figura 11. Desenho esquemático de um sistema de aquecimento solar residencial.

Fonte: MADEIRA(2013).

O sistema de captação aquece a água através da irradiação solar e, por meio do efeito termossifão, a água aquecida se desloca até o reservatório térmico, pela diferença de densidade da água aquecida e água fria. Este ciclo ocorre continuamente até que seja atingido o equilíbrio entre a água aquecida no reservatório térmico e a possibilidade de aquecimento nos coletores solares. Neste ponto o ciclo se encerra e é atingido o equilíbrio térmico. Caso a água quente que está no reservatório for consumida pela abertura do sistema de consumo, haverá uma nova entrada de água fria no reservatório térmico, assim dando início a um novo ciclo do termossifão entre as placas coletoras solares e o reservatório térmico.

O reservatório térmico armazena a água aquecida pelos coletores para utilização dentro do sistema de consumo, este então funciona como um reservatório de energia térmica (MADEIRA,2013).

1.6.2 Sistema com resistência auxiliar

Em ocasiões de baixa incidência de radiação solar, como em períodos de chuva, ou ainda em situações de grande consumo, o sistema não atinge o equilíbrio térmico, ou melhor, não consegue manter a temperatura no nível desejado de utilização. Sendo necessário a adição de calor complementar. Para estes casos existe a possibilidade de se associar sistemas termossolares com sistemas de aquecimento elétrico ou a gás.

A opção mais utilizada é aquecimento complementar no próprio reservatório térmico. Para este fim o reservatório deve possuir instalado uma resistência no seu interior, acionada por um termostato como visto na Figura 12, que mensura constantemente a temperatura da água. Se eventualmente esta não esteja na temperatura estabelecida para o ideal do consumo ajustada no termostato, o sistema de aquecimento complementar, a gás ou elétrico é acionado automaticamente. Assim este sistema possibilita que a água do reservatório permaneça na temperatura desejada para o consumo durante todo o tempo.

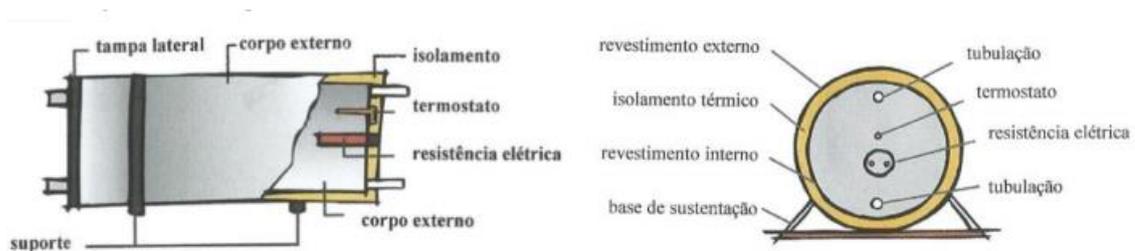


Figura 12. Composição do reservatório térmico com resistência.

Fonte: MADEIRA (2013).

Porém este sistema apresenta um pequeno inconveniente, Independente de haver ou não consumo, o sistema de controle de temperatura irá manter esta sempre em um nível alto, para isto ele irá acionar o sistema de aquecimento resistivo toda vez que a temperatura cair abaixo do nível regulado como desejado, consumindo uma alta quantia de energia elétrica nestes instantes. Assim nos dias ou momentos que não houver consumo desta água quente, haverá desperdício de energia elétrica, podendo até consumir mais energia elétrica que em um chuveiro elétrico simples. (PEREIRA ET AL 2003).

1.6.3 Sistema chuveiro “inteligente”

Outra opção para os momentos em que o sistema termossolar não é capaz de fornecer energia térmica o suficiente para atingir a temperatura ideal de consumo, é a utilização da evolução dos chuveiros convencionais, também chamado de chuveiro híbrido, que possui alguns dispositivos que proporcionam a redução do consumo da energia elétrica e a melhor uniformidade da temperatura da água do banho. Este equipamento é feito para ser utilizado consorciado ao sistema de aquecimento solar de água que tem como função complementar o aquecimento de água dos sistemas de coletor solar sem *boiler* com resistência ou seja sistema termossifão tradicional.

O chuveiro inteligente é composto essencialmente por um chuveiro elétrico convencional com a adição de um sistema de controle de potência com base na temperatura mensurada, e de acordo com a temperatura ajustada ele regula a potência que deve ser fornecida a resistência para atingir esta temperatura desejada ajustada.

No chuveiro convencional, a água fria proveniente da tubulação passa pela resistência interna para ser aquecida, com um consumo de potência constante pré-estabelecida pela regulagem, onde na maioria dos chuveiros é “verão” ou “inverno”, correspondendo à resistência ativada parcialmente ou por inteiro.

Segundo o estudo realizado por NASPOLINI (2012). Em um conjunto residencial de 90 residências localizado no Sul do Brasil na cidade de Florianópolis, obteve-se com o uso de chuveiros inteligentes, associado ao sistema de boiler solar com placas solares do tipo coletor fechado, observou-se uma redução no consumo médio de 38% e na demanda de ponta em 42% em 60 residências, quando se comparado com as outras 30 residências que dispunham de apenas chuveiros convencionais somente com ajuste de inverno verão e desligado GIMENES (2011).

Na Figura 13.b é visto o chuveiro inteligente, que ajusta automaticamente a potência necessária a ser adicionada, com base na regulagem do controlador visualizado na Figura 13.a.

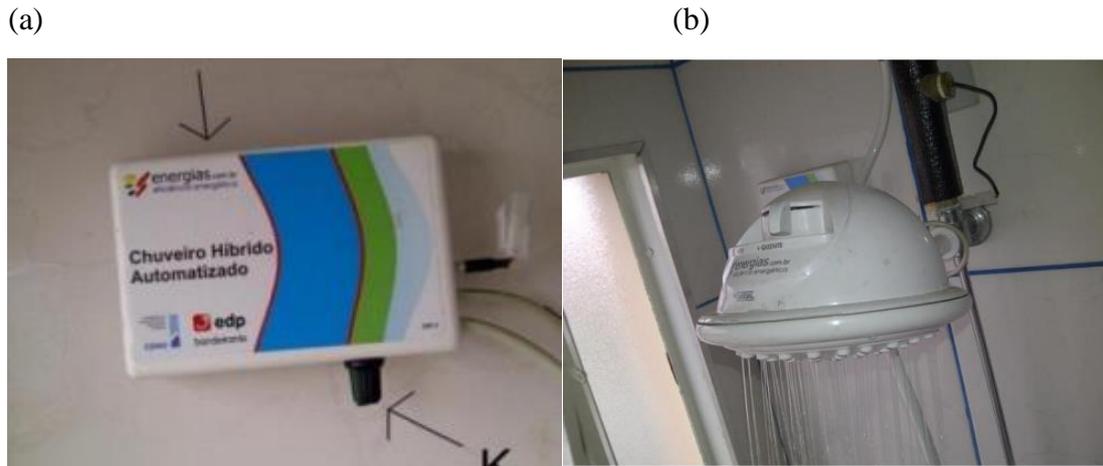


Figura 13. Controlador e “chuveiro inteligente”.

Fonte: MADEIRA(2013).

1.7 PAINÉIS TERMOSOLARES NO CONTEXTO INTERNACIONAL

Dentre os países que possuem maior potencial para o uso de painéis termossolares, segundo (WEISS et al., 2005), quem lidera em potência instalada é a China, tanto em coletores solares fechados com 4760 MW, como a vácuo com 30800 MW. E consequentemente em área instalada onde no total possui 51400000 m² instalados.

De acordo com (WEISS et al., 2005), o maior mercado do mundo em aquecedores solares é a China. Segundo (LI HUA, 2005), o governo possuía uma meta que até 2005 seriam 65 milhões de m² e 230 milhões de m² até 2015. De acordo com (SHW, 2014), esta meta foi atingida e superada com antecedência em 2012, quando o país contava com mais de 257 milhões de m² de coletores.

Enquanto que no resto do mundo predomina o uso de coletores solares planos, na China predomina os sistemas de coletores a tubos de vácuo (85% dos coletores) (mais eficientes), e quanto a seu uso 75% das instalações são de uso individual residencial, 20% em instalações coletivas e 5% usadas em indústrias. Li Hua (2005) destaca a necessidade da mudança da mentalidade daqueles que fazem o planejamento da expansão urbana, que todos que compõe a cadeia de construção civil devem trabalhar juntos para implementação de projetos piloto para difundir a confiabilidade e o entendimento do seu uso e quanto eficiente são os sistemas de aquecimento termossolares.

Fazendo um comparativo simples dos dados de área de painéis termosolares instalados em todo mundo dos anos de 2003 (WEISS et al., 2005) com os dados 2012 SHW (2014), houve um aumento de 290% na área de coletores instalados, passando de 132.481.202 m² para

384, 718,741m². Basicamente e majoritariamente alavancado pela simples instalação de mais de 200 milhões de m² na China, se isolando na liderança dos países com maior investimento em energia termossolar.

Outro país que também neste mesmo período avançou consideravelmente foi o Brasil, alavancado pelos programas sociais do governo federal, como o minha casa minha vida 2 (MADEIRA,2013) (DASOL-ABRAVA, 2012), onde nas 2 milhões de novas residências 60% são destinadas a HIS (habitações de interesse social), onde um dos requisitos é que todas as residências que estiverem dentro do projeto deverão incluir obrigatoriamente a instalação de sistemas de aquecedor solar, esse crescimento no Brasil também se deve ao interesse econômico ambiental. O total de investimento no programa "Minha Casa, Minha Vida", foi um investimento de R\$ 1,1 bilhão nos projetos de aquecimento solar (GOY, 2010).

Para que se tenha uma noção da grandeza da quantia de energia térmica absorvida pelos painéis termossolares instalados na China, com a sua instalação e uso, dispensa a necessidade de construção de aproximadamente 14 usinas hidroelétricas com potência equivalente a de ITAIPU (14,000MW) conforme a Figura 14. Um dos principais motivos do grande incentivo para a China instalar tantos painéis termossolares é para diminuir o consumo de carvão, que gera grande poluição atmosférica, e problemas respiratórios, principal causa de morte no país, assim investindo em energia solar o governo diminui os gastos com saúde.

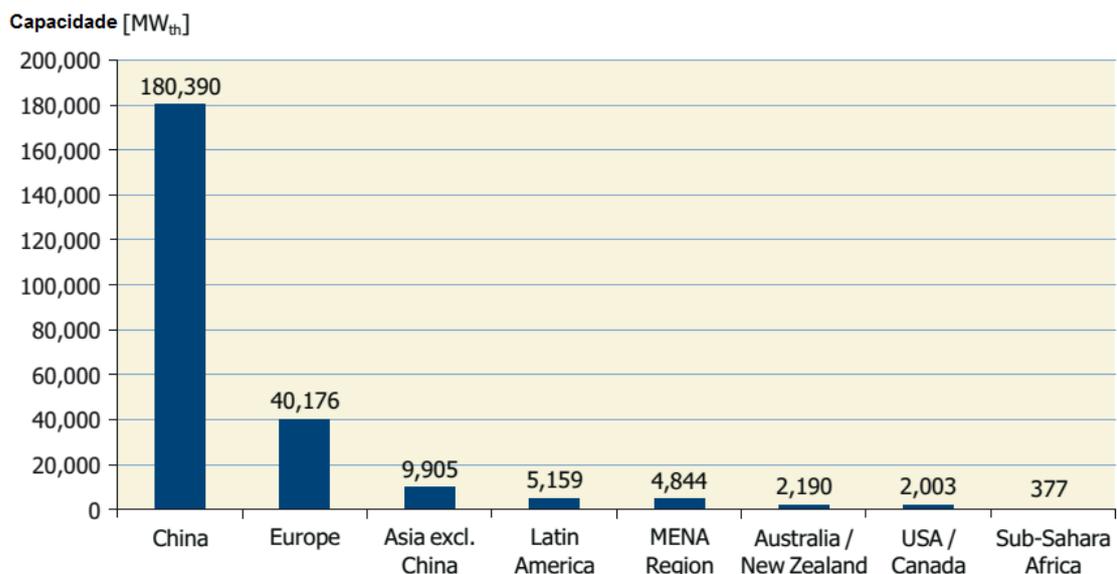


Figura 14. Capacidade total instalada de coletores solares de tubo evacuado em operação por região econômica no final de 2012.

Fonte: Adaptado de Solar Heat Worldwide (2014).

O uso de sistemas de aquecimento termossolares pode ser considerado um sistema de geração simples e de alta eficiência, pois elimina etapas e processos (geração transmissão), dispensa a necessidade de ampliação do sistema elétrico de potência (SEP). E pode substituir total ou parcialmente o consumo dos chuveiros no horário de pico, por consequência reduzindo ou eliminando o seu consumo de energia elétrica no horário de pico. É o sistema mais adequado para aquecimento de água onde há a disponibilidade de energia solar como é o caso do Brasil. (GOERCK, 2008).

1.8 USO RURAL E BENEFICOS DO USO DE SISTEMA DE AQUECIMENTO DE AGUA TERMOSSOLAR

Painéis termossolres podem ser utilizado em residências unifamiliares rurais, HIS (Habitação de Interesse Social), moradias em geral, indústrias e também em propriedades rurais onde pode ser utilizado no aquecimento de água para higienização de equipamentos de ordenha (ALTOE & OLIVEIRA FILHO, 2010).

Pode ser utilizado principalmente almejando de maneira geral, reduzir a necessidade do uso de eletricidade para o aquecimento de água, principalmente por meio de chuveiros e assim conseguir amenizar a demanda de energia elétrica por parte das residência, principalmente no horário de pico (18 as 21hs), além de diminuir a demanda de energia elétrica por parte das residências, que fara com que os a falta de água nos períodos de estiagem seja menos sentida, pois há uma demanda menor por energia elétrica (OLIVEIRA et al, 2008).

1.9 OBEJETIVO

Objetivo geral:

Avaliar o desempenho de um sistema de aquecimento de água termossolar, feito com materiais comumente encontrados em construção civil.

Objetivo específicos

- Verificar a quantia de energia absorvida e a eficiência do sistema durante o período de coleta de 1 ano.

- Comparar o desempenho do sistema fabricado com materiais alternativos, com o de sistemas fabricados por indústrias especializadas na fabricação de coletores solares térmicos.

- Para verificar o potencial técnico da utilização de placas termossolares fabricadas com materiais comumente encontrados em construção civil serão testadas duas hipóteses.

H1 – Painéis termossolares de placa plana fabricados com materiais comumente encontrados em construção civil podem ser utilizados para o aquecimento de água.

Vs

H0 – Painéis termossolares de placa plana fabricados com materiais comumente encontrados em construção civil não podem ser utilizados para o aquecimento de água.

Para testar estas hipóteses será comparado o valor de eficiência média obtido com este painel, com os valores de eficiência encontrados com os resultados de outros pesquisadores que estudaram o desempenho de sistemas fabricados com material padrão para este fim. Caso o valor encontrado seja próximo igual ou superior será rejeitado H0.

Os dados de desempenho obtidos representarão uma base para o dimensionamento de sistema de aquecimento de água, ou uma noção da economia que o sistema poderá representar em sistemas híbridos que aquecem a água tanto com energia solar como com energia elétrica através de chuveiros, já que a unidade de medida da energia absorvida é a mesma do consumo de chuveiros.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 COLETOR SOLAR PLANO

A montagem do coletor solar plano e a coleta dos dados para análise realizou-se no município de Cascavel-PR, no campus da UNIOESTE com localização geográfica latitude (24 56' 26" S) e longitude (53 33' 32" O) dentro Centro de Análises de Sistemas Alternativos de Energia – Casa Inteligente, que reproduz as condições de uma unidade residencial unifamiliar rural. A inclinação da instalação do painel foi de 35°C visando uma produção equilibrada de energia entre inverno e verão (GNOATTO, 2008).

O coletor solar plano montado de 1m² de área é composto basicamente por cinco elementos principais:

1° Cobertura transparente: (vidro 3 mm transparente).

2° Placa absorvedora: Placa de alumínio com forma de omega tem em suas laterais inclinação de 45 graus a cada 2.5 cm (pintada de preto brilhante).

3° Tubulação: Tubos de PVC 32mm (pintados com tinta preto fosco).

4° Isolante térmico: O isolante térmico (espuma de poliuretano expandido TYTAN PRO 30).

5° Caixa estrutural: Feita com uma caixa de alumínio rebitada, a montagem esquemática do coletor é visualizada na Figura 15 e o conjunto montado instalado e operando na Figura 16.

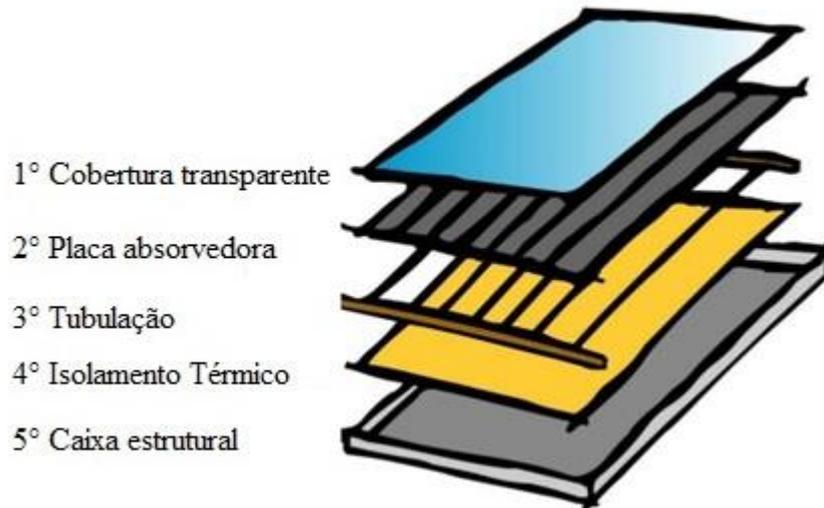


Figura 15 - Coletor de placa plana (FPC).



Figura 16. Conjunto placa termossolar – reservatório térmico instalado.

A cobertura transparente é encarregada de produzir o efeito estufa, reduzir as perdas por convecção e garantir a estanqueidade do coletor à água e ao ar, em união com a carcaça e as juntas. O efeito estufa produzido pela cobertura faz com que uma parte da radiação que

atravessou a cobertura seja retida no interior do coletor. Com esse efeito, espera-se obter um alto coeficiente de transmissão da irradiação solar; um baixo coeficiente de transmissão para as ondas longas; um baixo coeficiente de condutividade térmica; um alto coeficiente de reflexão para a longitude de onda longa da radiação emitida pela placa coletora. O calor absorvido pela placa de alumínio pintada de preto brilhante é retido no interior do coletor de placa plana (FPC) é transferido para a água através colunas de PVC, pintadas de preto fosco. Apesar de simples, um sistema de aquecimento solar possui detalhes fundamentais, na sua confecção e instalação, para um bom funcionamento.

A caixa de alumínio, que é um metal leve e resistente, está localizado abaixo dos tubos de PVC, e está protegida em sua parte inferior com uma lâmina de isolamento térmico para evitar as perdas de calor para o exterior. A característica principal do isolante é resistir a altas temperaturas sem se deteriorar e ter baixo coeficiente de condutividade térmica. O material usado foi uma espuma composta por poliuretano expandido que tem em suas propriedades uma densidade entre 30–80 kg/m³, resistência à compressão de 200 N/mm², condutividade térmica em torno de 0,023 W/m*K, coeficiente de fricção $\mu=0,0135$, coef. de condutividade igual a 0,030 kcal/h*m*°C, sua temperatura de trabalho ótima gira em torno de -40 a 115 °C, leve e não conduz corrente elétrica, permite ampla flexibilidade de projeto possibilitando a moldagem de peças envoltas ao coletor. A carcaça do FPC é composta de um perfil de alumínio reciclado.

O reservatório térmico é composto por uma caixa de água de fibra de vidro, envolta por uma manta térmica asfáltica visando o isolamento térmico. Ao seu interior foram colocados esferas de poliestireno de 7,5 cm de diâmetro, que após a entrada da água irão boiar e isolar a superfície superior da água das trocas térmicas com a parte superior da caixa de água. No espaço da diferença de altura da entrada de água e da tampa foram adicionadas as esferas até completar o reservatório.

2.2 COLETA DOS DADOS

Foram coletados dados de irradiação solar global, temperatura da água do reservatório e temperatura ambiente. Para a coleta dos dados de irradiação solar global utilizou-se um piranômetro de fabricação Kipp & Zonen, modelo CMP3 visualizado na Figura 19. Na Tabela 5 são descritas as características técnicas do instrumento, com uma sensibilidade de 15,3 $\mu\text{V W}^{-1} \text{ m}^2$, instalado próximo ao coletor demonstrado esquematicamente na Figura 17. Para

medição de temperatura utilizou-se dois termopares tipo J um conectado ao reservatório (T_r) e outro na sombra do painel ao ar livre para medir a temperatura ambiente (T_a).

A leitura e aquisição dos dados foi feita por um Datalogger CR-1000 mostrado na Figura 18, no qual todos os sensores foram conectados. O Datalogger foi programado para efetuar leituras a cada 5 segundos e a cada 5 minutos calcular a média aritmética destes valores e armazená-los. A coleta de dados se deu por um período de um ano compreendido entre o dia 10 julho de 2014 a 10 de julho de 2015.

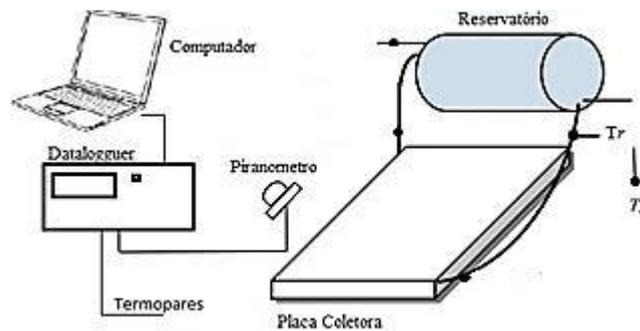


Figura 17. Esquema da coleta dos dados montado no experimento.



Figura 18. Datalogger CR-1000 e computador utilizado no experimento.



Figura 19. Piranômetro CMP3.

Tabela 5. Demais especificações técnicas Piranômetro CMP3.

Dimensões	ϕ7,5 cm x 10 cm
Peso	543 g
Tempo de resposta 95%	18 s
Faixa Espectral	310 a 2800 nm
Sensibilidade	5 a 15,3 μV W ⁻¹ m ²
Temperatura de operação	-40 °C a +80 °C
Máxima irradiância	2000 Wm ²
Precisão	±5%

Fonte: Campbell Scientific CMP3-L.

2.3 ANÁLISE DO DESEMPENHO

O parâmetro principal utilizado para analisar o desempenho do sistema foi à eficiência. Para calcular o seu valor é necessário obter a quantia de energia térmica que foi absorvida pelo sistema, (Deli Ling. et al. 2015). Para isto utilizou-se a Equação 1.

$$Qd = \frac{m Cp (TrM - Trm)}{860} \quad (1)$$

Em que:

Qd – energia diária absorvida (Wh/dia).

m – massa de água (g). (1000kg/m²)

Cp – calor específico da água (cal/g °C). (1 cal/g °C).

TrM – temperatura mínima do reservatório registrada no dia (°C).

Trm – temperatura máxima do reservatório registrada no dia (°C).

Para obter o valor de irradiação solar médio horário calculou-se a média dos valores registrados pelo Datalogger através da Equação 2. Somando todos estes valores obteve-se a energia total absorvida diária, representado pela Equação 3, para todos os dias do período. Considerando os valores totais diários de irradiação solar (Energia de Entrada) e os valores de energia diária absorvida (Saída de Energia), obteve-se a eficiência do sistema através da Equação 4.

Irradiação média horaria:

$$Is (Wh/m^{-2}) = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} x_i \quad (2)$$

x_i = Valor do dado.

i = Número do dado.

12 = Número de dados por hora.

Irradiação solar global média diária:

$$Pd Is \left(\frac{Wh}{m^{-2}} * dia \right) = \sum_{i=1}^{24} x_i \quad (3)$$

x_i = Valor do dado.

i = Número do dado.

24 = Número de horas por dia.

$$\eta_s = \frac{Qd}{Ac * Id} * 100 \quad (4)$$

Em que:

η_s = Eficiência sistema (%).

Qd = Energia diária absorvida (Wh/dia).

Id = Irradiação total do dia (Wh/m².dia).

Ac = Área coletor(m²). (1 m²).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a irradiação solar global incidida sobre o plano horizontal dos painéis (IGH) no dia de maior incidência no mês de dezembro que no caso foi o dia 04 de dezembro de 2014 obteve-se uma média de irradiação de 328,02Wh/m² ao longo do dia. Na Figura 20 pode-se observar na variação da irradiação neste dia ocasionada pela variação natural da nebulosidade de nuvens altas, atingindo um pico máximo de 1296 Wh/m² as 14:55 hs. Neste dia a irradiação solar total registrada foi de 7872,47 Wh/m².dia. Valores semelhantes aos encontrados por (Kwanho Lee et. Al.,2013) que encontrou um valor máximo de irradiação de 1258 Wh/m², (BEKKIOUI, Naoual et al .2011) que observou aproximadamente 1185 Wh/m², (Colienne Demain et. Al, 2013) que mediu aproximadamente 1210 Wh/m², todo em um dia de verão de com boa irradiação incidente, ou seja com poucas nuvens.

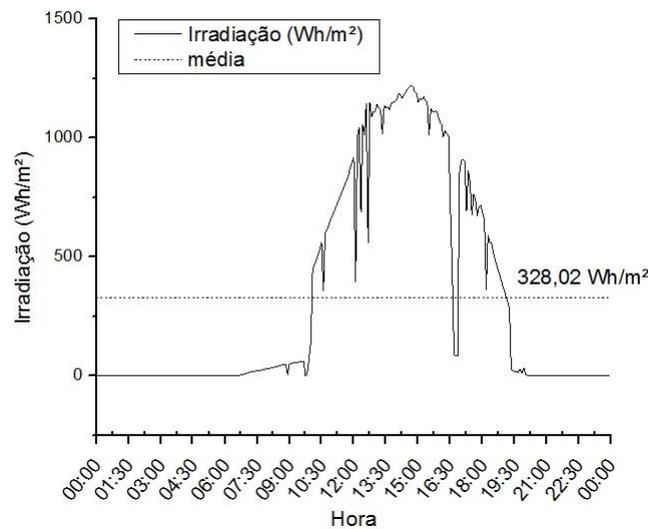


Figura 20. Irradiação solar global no plano inclinado (IGH) ao longo do dia 20 de Dezembro de 2014.

Ao analisar os dados de energia solar ou irradiação solar total, observados na Figura 21 e na Tabela 7, em cada mês do período estudado, é possível verificar que o mês de agosto/2014 apresentou o maior valor de irradiação total incidente, se comparado com os outros meses, com um valor de 164.637,28 Wh/m^2 .mês, e o mês de julho/2014 apresentou o menor valor com 65.570,06 Wh/m^2 .mês. Deve-se levar em consideração que as medidas iniciaram-se a partir do dia 11 de julho de 2014, então somando a irradiação dos primeiros 10 dias de julho de 2015 com os dados do mês de julho de 2015, tem-se que o mês de julho teve ainda assim a menor irradiação solar total com 88657 Wh/m^2 .mês.

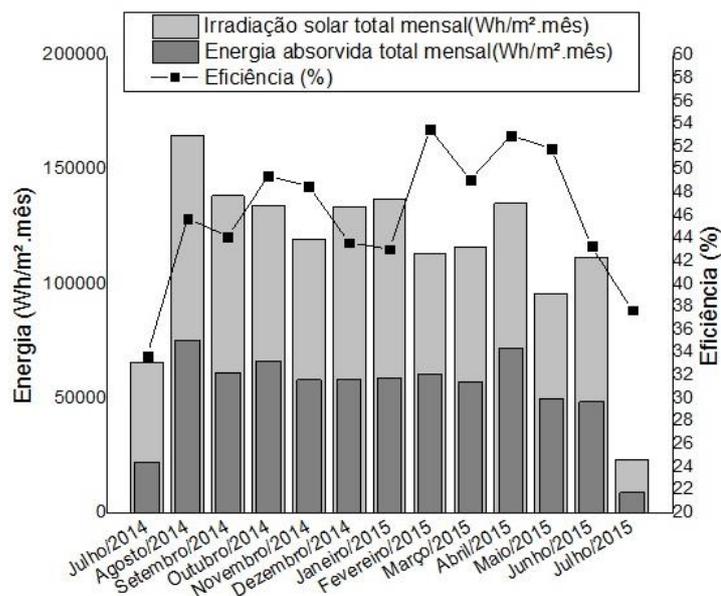


Figura 21. Energia solar mensal e absorvida e eficiência do sistema.

O mês de maior absorção de energia foi o mês de agosto com 75291 Wh/m².mês absorvidos pelo sistema, sendo que o mês de menor absorção foi o mês de julho, Considerando os dados de 2014 e 2015 com 30792 Wh/m².mês, a média de irradiação absorvida foi de 1905 Wh/m²/dia para todo o período. A irradiação solar média para o município de Cascavel-PR para o dado período e condições do experimento foi de 4074 Wh/m².dia, valor que fica dentro da variação encontrada por (CRESESB, 2000) para Cascavel-PR, que encontrou uma variação de 3530 a 5140 Wh/m².dia.

Tabela 7. Dados de desempenho do sistema.

	Irradiação solar total mensal (Wh/m ² .mês)	Energia absorvida total mensal (Wh/m ² .mês)	Eficiência (%)	Temperatura ambiente média (°C)
Julho-14	65.570	22.090	33,6	17,4
Agosto-14	164.637	75.291	45,7	20,6
Setembro-14	138.395	61.086	44,1	23,0
Outubro-14	134.244	66.349	49,4	24,8
Novembro-14	119.332	57.915	48,5	22,8
Dezembro-14	133.778	58.315	43,5	23,4
Janeiro-15	136.880	58.885	43,0	24,3
Fevereiro-15	113.240	60.624	53,5	22,5
Março-15	115.713	56.802	49,0	24,7
Abril-15	135.015	71.496	52,9	22,9
Mai-15	95.561	49.550	51,8	18,4
Junho-15	111.600	48.282	43,2	19,1
Julho-15	23.087	8.702	37,6	15,6
Total	1424.590	695.394	-	-
Média anual	118.716	57.949	45,9	21,5

Ao longo do período de coleta de um ano o sistema absorveu em um 1m² de placa coletora plana 695.394 Wh de energia térmica.

O mês de agosto apresentou a maior irradiação solar total devido ao fato da ocorrência de um maior número de dias com baixa nebulosidade. Já a partir do mês de setembro observa-se que ocorre a diminuição da irradiação total incidida ocasionado, pelo maior número de dias com maior nebulosidade, assim diminuindo a irradiação que atinge a placa e por consequência a energia absorvida.

Verificando a variação da eficiência em todo o período ilustrada na Figura 22, o mês de maior eficiência de conversão foi fevereiro/2015 com 53,54% de eficiência com temperatura média ambiente de 20,65°C, e o mês de menor foi julho/2014 com 33,7% e temperatura ambiente média de 17,42°C. A eficiência média do sistema ficou em 45,9% ao longo de um ano, a temperatura média dentre o período ficou em 21,54°C, sendo que o mês

mais Frio foi o mês de julho/2015 com 15,63°C, e o mês mais quente foi outubro/2014 com 24,86°C.

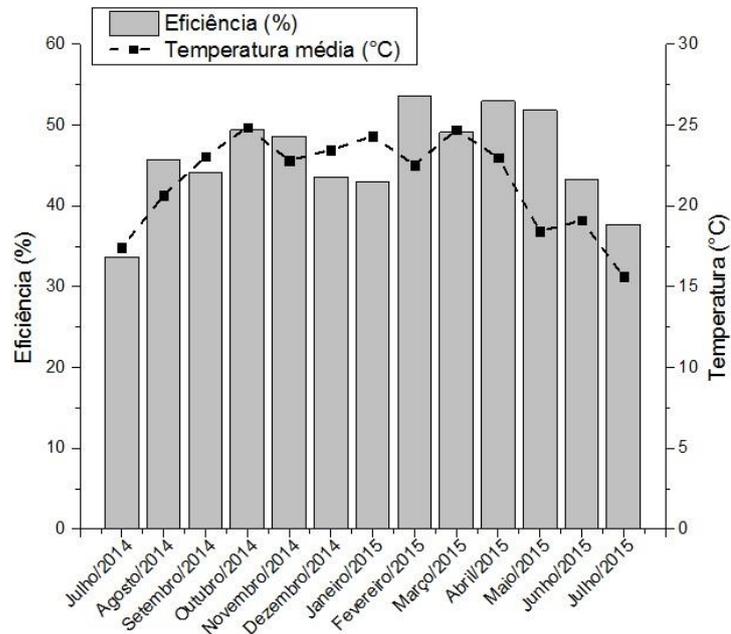


Figura 22. Eficiência e temperatura no período avaliado.

Os valores de eficiência encontrados, ao analisar o sistema, estão na mesma faixa de variação dos valores médios mensais encontrados por (L.M. Ayompe, A. Duffy.2013), com eficiências variando de 39-55% e (TGSE 2007) que encontrou 35-40% de variação de eficiência.

Analisando os valores médios de eficiência mensal e temperatura do ar, não se pode afirmar que haja uma relação direta entre eficiência e temperatura, mas nos primeiros quatro meses observa-se que a eficiência e temperatura aumentaram conjuntamente, e nos dois últimos meses também ocorreu relação entre a variação destas duas medidas. Nos outros meses não se verifica relação entre eficiência e temperatura média.

Já Analisando a variação da energia solar diária e a absorvida pelo sistema no mês de setembro de 2014, mostrada na Figura 23, verificou-se que neste mês a variação da eficiência do sistema acompanha a variação da temperatura ambiente. Onde em dois dias no dia 14, e no dia 26, ocorreu uma queda na temperatura ficando em torno de 15°C e isto ocasionou uma diminuição drástica na eficiência do sistema ficando abaixo dos 30%, abaixo dos 44,14% médio mensal. Este fato deve ser ocasionado pela perda térmica que ocorre em alguns pontos do sistema, apesar de não ter-se efetuado medições de velocidade do vento nos dias de queda

de temperatura nestes dias houve rajadas de vento associada á passagem de frentes frias característica deste período, que potencializa a dissipação de calor absorvido pelo sol.

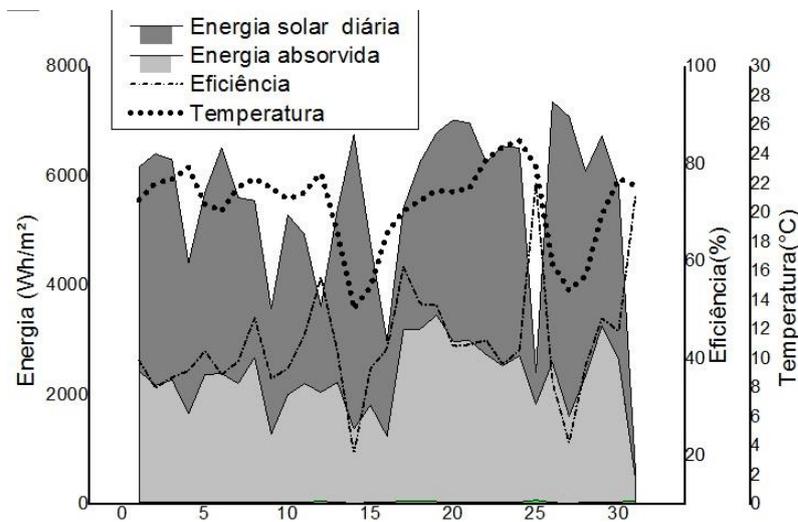


Figura 23. Energia solar diária e absorvida, eficiência e temperatura no mês de setembro/2014.

4 CONCLUSÃO

De maneira geral pode-se verificar que o sistema, apresentou eficiência média satisfatória de 45,9%, compatível com a encontrada por outros pesquisadores que avaliaram sistemas fabricados com materiais padronizados para este fim, revelando que o sistema composto por materiais comumente utilizados em construção civil pode ser utilizado em sistemas de aquecimento de água residencial assim rejeita-se H₀, ou seja, painéis fabricados com materiais comumente encontrados em construção civil podem ser utilizados para o aquecimento de água com desempenho satisfatório.

O sistema absorveu ao longo de todo o período estudado 695.394 Wh de energia térmica, com uma média diária de 1905 Wh/m². Esta energia pode ser utilizada para substituir chuveiros elétricos no aquecimento de água, ou em sistemas híbridos com aquecimento de água elétrica solar minimizar o consumo de energia elétrica. Medidas que auxiliam na diminuição da dependência dos combustíveis fósseis e sustentabilidade energética residencial.

Os dados de desempenho podem ser utilizados para dimensionamento de sistemas de coletores termossolares de água, para suprir total ou parcialmente a demanda por água quente.

O sistema consiste em uma forma de converter energia solar em energia útil de alta eficiência quando se comparado com outras tecnologias de conversão de energia solar em

energia útil como a fotovoltaica, caracterizando um sistema que aquece a água de maneira eficiente.

5 REFERÊNCIAS

ABRAVA. O mercado elege o Sol. Disponível em <http://www.abrava.com.br/?Canal=8&Channel=Tm90JiMyMzc7Y2lhcw==&OperId=3937>. Acesso em 16/07/2012

ALTOE, Leandra; OLIVEIRA FILHO, Delly. Utilização de sistemas fototérmicos com concentradores para higienização de salas de ordenha. Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 30, n. 5, out. 2010. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162010000500003&lng=pt&nrm=iso. acessos em 24 mar. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162010000500003>

BEKKIOUI, Naoual et al. Solar drying of pine lumber: Verification of a mathematical model. Maderas, Cienc. tecnol., Concepción, v. 13, n. 1, p. 29-40, 2011, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2011000100003>.

CPT. Energia Solar para Aquecimento de Água. CEPEL. Minas Gerais, 2001 (Energia Alternativa – Manual nº 307).

Colienne Demain, Michel Journée, Cédric Bertrand, Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces, Renewable Energy, Volume 50, February 2013, Pages 710-721, ISSN 0960-1481, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.07.031>.

DASOL-ABRAVA. Departamento Nacional de Aquecimento Solar. Associação Brasileira de Refrigeração, Ar-Condicionado, Ventilação e Aquecimento. EDP Bandeirante inaugura “Projeto Boa Energia Solar” em Pindamonhangaba. 2010. Disponível em: <http://www.dasolabrava.org.br/2010/10/edp-bandeirante-inaugura-%E2%80%9Cprojeto-boa-energiasolar%E2%80%9D-em-pindamonhangaba/>

ELETROBRAS. Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005: classe Residencial Relatório Brasil - Sumário Executivo. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2009. 187 p. (Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil).

ELETROBRÁS.PROCEL. Energia Solar para aquecimento de água no Brasil: Contribuições da Eletrobrás Procel e Parceiros / Luiz Eduardo Menandro de Vasconcellos; Marcos Alexandre Couto Limberger (Organizadores). – Rio de Janeiro: Eletrobras, 2012. 240 p. : il. Disponível em : http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/60553/mod_resource/content/1/Livro%20Solar.pdf

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço energético nacional 2011: ano base 2010. Rio de Janeiro, 2011- a. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/default.aspx>. Acesso em: 2015.

EPE. 2014, Anuário estatístico de energia elétrica 2014. Acesso em 23/03/2015. Disponível em

<<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202014.pdf>>

ENVIRO-FRIENDLY. Disponível em <<http://www.enviro-friendly.com/evacuatedtube-solar-hot-water.shtml>>. Acesso em Fev. 2006.

FARIA, C. F. da C. Estratégias para o Aquecimento Solar no Brasil: Mercado, Perspectivas e Plano de Ação. 2004. 182f. Monografia (Pós-Graduação Latu Sensu em Fontes Alternativas de Energia), Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2004.

GIMENES, A.L.V, SILVESTRE, W.P. UDAETA, M.E.M. Viabilidade da execução de projeto de eficiência energética com uso de energias renováveis mediante implantação de equipamento híbrido fotovoltaico e térmico para geração de eletricidade e aquecimento de água com energia solar para substituição de chuveiros elétricos. In. Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, 21. 2011, Florianópolis. Revista XXI SNPTEE. Florianópolis. vol. 2 Fevereiro | 2011.p.43.

GOERCK, M. Determinação do potencial energético de um coletor solar foto térmico na região do vale do Taquari – RS Brasil. Lajeado. Centro Universitário Univates. 2008. 92p. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento)

GOY, Leonardo. Casa Civil corrige: PAC 2 prevê R\$ 1,088 tri em energia. Isto é dinheiro. [S.l.] 29 mar 2010. Economia on line. Disponível em http://www.istoedinheiro.com.br/noticias/18144_CASA+CIVIL+CORRIGE+PAC+2+PREVE+R+1088+TRI+EM+ENERGIA. Acesso em 03 jan. 2013.

HELIOTEK. Disponível em: <<http://www.heliotek.com.br>>. Acesso em fev. 2015.

Kwanho Lee, Hochun Yoo, Geoff J. Levermore, Quality control and estimation hourly solar irradiation on inclined surfaces in South Korea, Renewable Energy, Volume 57, September 2013, Pages 190-199, ISSN 0960-1481, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.028>.

L.M. Ayompe, A. Duffy. Analysis of the thermal performance of a solar water heating system with flat plate collectors in a temperate climate, Applied Thermal Engineering 58 (2013) 447 e 454.

LI, HUA. “From quality to quantity: How China’s maturing solar thermal industry will need to face up to market challenges”. Earthscan REW Renewable heat, 2005.

MADEIRA, GUILHERME, S. Análise do uso de sistemas de aquecimento solar de água em habitações de interesse social, Estudo de caso: Conjunto Habitacional Pindamonhangaba “F” – SP. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do ABC. Santo Andre – SP.2013.

NASPOLINI, H. F.; Rütther, R. Assessing technical and economic viability of low cost domestic solar hot water systems (DSHWS) in low income residential dwellings in Brazil. Renewable Energy. 2012, vol. 48, p 92-99

NORTON, B. Anatomy of a solar collector. Refocus, vol. 7, ed.3, p. 32-35. 2006.

OLIVEIRA, Luiz F. C. de et al . Potencial de redução do consumo de energia elétrica pela utilização de aquecedores solares no Estado de Goiás. Eng. Agríc., Jaboticabal , v. 28, n. 3, set. 2008 . Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162008000300002&lng=pt&nrm=iso>. acessos em 24 mar. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000300002>.

PRADO, R.T.A. et al. Levantamento do estado da arte: Energia solar. Projeto tecnologias para construção habitacional mais sustentável. São Paulo Projeto FINEP 2386/04. 2007.

PEREIRA, E. M. D.; DUARTE, L. O. M.; PEREIRA, L. T.; FARIA, C. F. da C. Energia Solar Térmica. In: TOLMASQUIM, M. T. (org), 2003, Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2003.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. V. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 1ª. ed. São José dos Campos. INPE, 2006.

SCHAEFFER, R., COHEN, C. A. (org), 2007. Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil (BRA/01/001): Simulação de Potenciais de Eficiência Energética para o Setor Residencial. Programa de Planejamento Energético - PPE/COPPE/UFRJ, 2007.

Solar Energy Perspectives. International Energy Agency (2011) (http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/solar_energy_perspectives2011.pdf)

Solar Energy Perspectives. International Energy Agency (2011) (http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/solar_energy_perspectives2011.pdf)

SOUZA, Ozair et al . Energia alternativa de biomassa: bioetanol a partir da casca e da polpa de banana. Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande , v. 16, n. 8, Aug. 2012 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662012000800015&lng=en&nrm=iso>. access on 24 Mar. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000800015>.

SHW. Solar heat worldwide. Markets and Contribution to the Energy Supply 2012. Franz Mauthner and Werner Weiss. AEE - Institute for Sustainable Technologies and IEA Solar Heating & Cooling Programme. 2014.

TOLMASQUIM, t. Mauricio (org.). Fontes renováveis de energia no Brasil. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

Transforming Global Market for Clean Energy Products: Energy Efficient Equipment, Vehicles and Solar Photovoltaics. International Energy Agency (2010) (http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/global_market_transformation.pdf)

WEISS, W.; BERGMANN, I. e FANINGER, G. Solar Heating Worldwide: Markets and Contribution to the Energy Supply 2003. IEA Solar Heating & Cooling Programme, Maio 2005. Disponível em: <<http://www.ieashc.org/welcome/IEASHCSolarHeatingWorldwide2005.pdf>>. Acesso em fev. 2015.

CAPITULO 2 – DESEMPENHO E EFEITO DO RESFRIAMENTO SOBRE UM SISTEMA DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA DE 66W VISANDO A SUSTENTABILIDADE ENERGETICA RURAL OU URBANA

1 INTRODUÇÃO

Na Tabela 1 está especificado a composição do consumo de energia elétrica por classe, onde o quanto cada um destas classes participaram no consumo final total da energia elétrica consumida no Brasil ao longo do período de 5 anos, onde os setores de maior destaque no consumo é o industrial e o residencial, 39,8 e 27% do consumo total respectivamente, as duas classes somadas respondem por aproximadamente 67 % do consumo de energia elétrica no Brasil em 2013 (EPE, 2014).

Tabela 1. Consumo por classe (GWh).

	2009	2010	2011	2012	2013	Δ% (2013/2012)	Part. % (2013)
Brasil	384.306	415.683	433.034	448.171	463.335	3,4	100,0
Residencial	100.776	107.215	111.971	117.646	124.896	6,2	27,0
Industrial	161.799	179.478	183.576	183.475	184.609	0,6	39,8
Comercial	65.255	69.170	73.482	79.226	83.695	5,6	18,1
Rural	17.304	18.906	21.027	22.952	23.797	3,7	5,1
Poder público	12.176	12.817	13.222	14.077	14.608	3,8	3,2
Iluminação pública	11.782	12.051	12.478	12.916	13.512	4,6	2,9
Serviço público	12.898	13.589	13.983	14.525	14.847	2,2	3,2
Próprio	2.319	2.456	3.295	3.354	3.372	0,5	0,7

Fonte: Adaptado de (EPE, 2014).

Na composição do consumo residencial mostrado na Figura 1, destaca-se que o chuveiro corresponde a 24% do consumo total, onde uma alternativa para reduzir o seu consumo pode-se citar o uso de painéis termossolares. Outro componente que merece destaque é a energia gasta para condicionamento de ambientes, que passou por um grande crescimento nos últimos anos como a popularização de seu uso. Por consequência da maior facilidade ao acesso a financiamentos, além da evolução tecnológica do processo de instalação e fabricação com o uso de ar condicionado Split que se tornaram economicamente mais acessíveis (EPE, 2014).

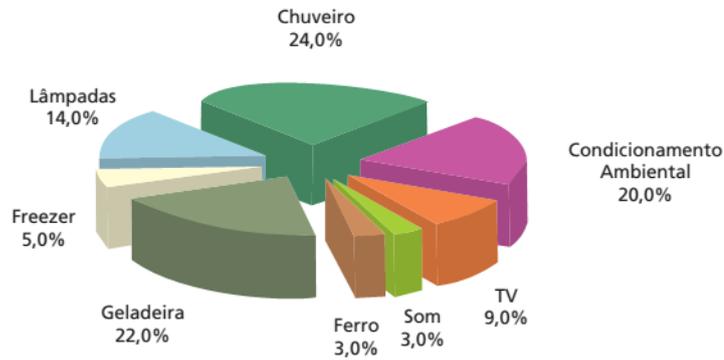


Figura 1. Composição do consumo residencial Brasileiro.

Fonte: (Eletrobrás, 2009).

Do início da era industrial até hoje, a principal fonte energética utilizada para geração de energia elétrica são os combustíveis fósseis, herança do período medieval, onde o carvão era a principal fonte de calor. Em nível mundial hoje mais de 75% da energia elétrica gerada é proveniente de combustíveis fósseis como visualizado nas Figuras 2 e 3. Os principais combustíveis fósseis utilizados para geração de eletricidade são o gás natural, o carvão e o petróleo.

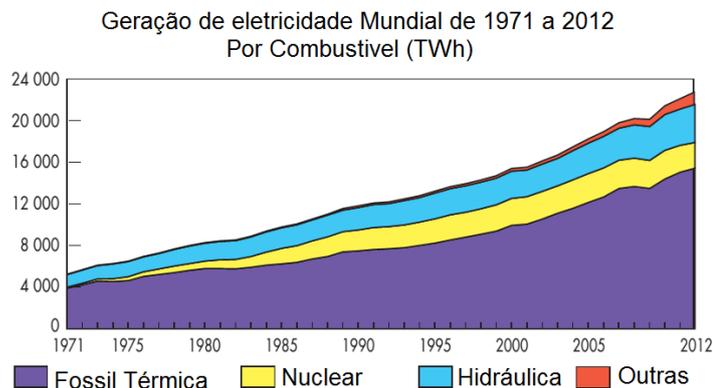


Figura 2. Geração mundial de energia elétrica de 1971 até 2012 por combustível (TWh).

Fonte: Adaptado de (IEA, 2014 a.)

Com a consciência de sua finitude e os danos ambientais que estas fontes causam ao nosso meio ambiente e por consequência a espécie humana, bem como a importância da energia elétrica dentro da sociedade, esta necessidade incentiva à busca crescente por novas fontes e meios tecnológicos para sua geração, que possam proporcionar a sustentabilidade energética para as nossas sociedades. E como visto no Capítulo 1 dentre as mais promissoras das fontes renováveis a energia solar é a que apresenta o maior potencial. (IEA, 2011).

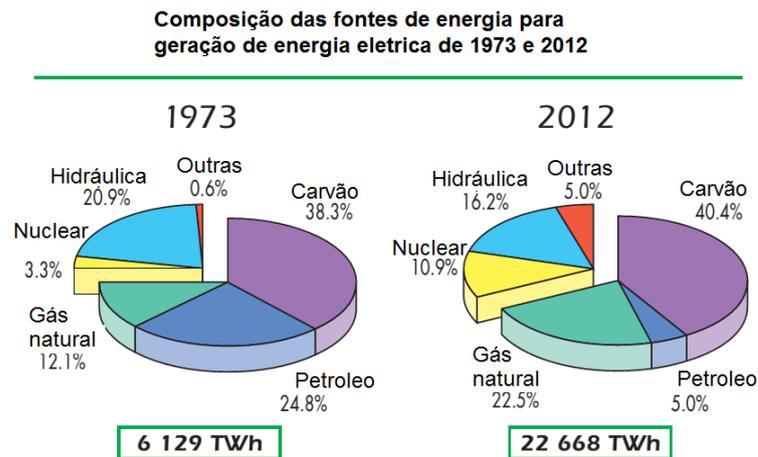


Figura 3. Composição da geração de eletricidade mundial de 1973 e 2012.

Fonte: (IEA, 2014 a.)

A tendência para os próximos anos seria à volta do crescimento da energia nuclear, pelo fato de necessitar infraestrutura de menor tamanho além de ocupar menor e espaço por MW, além de gerar mais energia com uma pequena quantidade de material, quando se comparado com outras fontes de energia como a eólica, termelétricas a gás e eólicas. Também não produz alagamentos e nem poluição do ar. Mas em contrapartida na produção de energia pela matriz nuclear há altos riscos de outras formas de contaminação do ambiente, ocasionado pelo resíduo que é o material radioativo em caso de acidente, principalmente o solo e os lençóis freáticos e aquíferos (SILVA et. al, 2002), como ocorrido em Chernobyl em 1986, e recentemente em Fukushima em 2011 no Japão. Neste contexto a Alemanha está lançando um programa chamado de “virada energética”, onde o principal objetivo é até o ano de 2022 possuir infraestrutura para geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, ao ponto de poder desativar as usinas nucleares (TRIGUEIRO, 2013).

As fontes de energia renovável para geração de eletricidade que a Alemanha está fomentando é basicamente a solar fotovoltaica, o biogás, a energia eólica, e a energia solar concentrada (CSP) (TRIGUEIRO, 2013).

Outro fator que estimula o desenvolvimento das energias renováveis na Alemanha é o fato de que o custo da geração de eletricidade dentro do país ser o terceiro mais alto do mundo, por exemplo, o custo tarifário residencial no ano de 2011 ficou em 251,10 €/MWh gerado visualizado na Tabela 2, e o custo para o mesmo período da geração fotovoltaica ficou em 203 €/MWh, assim sendo mais vantajoso a geração por energia solar (EUROPE’S ENERGY PORTAL, 2012).

Tabela 2. Tarifa média de fornecimento residencial nos países selecionados.

Consumo de 625kWh por mês

País	€/MWh	País	€/MWh	País	€/MWh
Bulgária	90,90	Reino Unido	143,20	Espanha	183,90
Estônia	106,10	Polônia	145,80	Irlanda	184,00
Romênia	111,90	Grécia	152,70	Áustria	188,80
Letônia	112,60	Eslováquia	157,50	Bélgica	191,10
Rep. Tcheca	121,20	Hungria	163,20	Chipre	202,90
França	125,40	Portugal	165,00	Holanda	233,60
Lituânia	126,80	Suécia	170,70	Alemanha	251,10
Finlândia	131,30	Luxemburgo	179,60	Dinamarca	255,30
Eslovênia	142,20	Malta	180,30	Itália	256,80

Mês de referência: junho de 2011

Fonte: (EUROPE'S ENERGY PORTAL, 2012).

1.2 TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR EM ELÉTRICA EXISTENTES EM OPERAÇÃO

1.2.1 Energia Solar Concentrada

Dentre as possíveis tecnologias em desenvolvimento para converter a energia solar em energia elétrica, a mais promissora ou de maior potencial é a energia solar concentrada, captada por concentradores solares parabólicos (CSP). Por apresentar uma boa eficiência, e possibilitar o armazenamento da energia em forma de calor.

De acordo com as políticas de energia, o plano dos países do sul da Europa e os da EU (União Europeia), até 2050 a sua principal fonte da matriz de energia elétrica seja a energia proveniente de usinas CSP conforme visualizado na Figura 4 (IEA, 2011b).

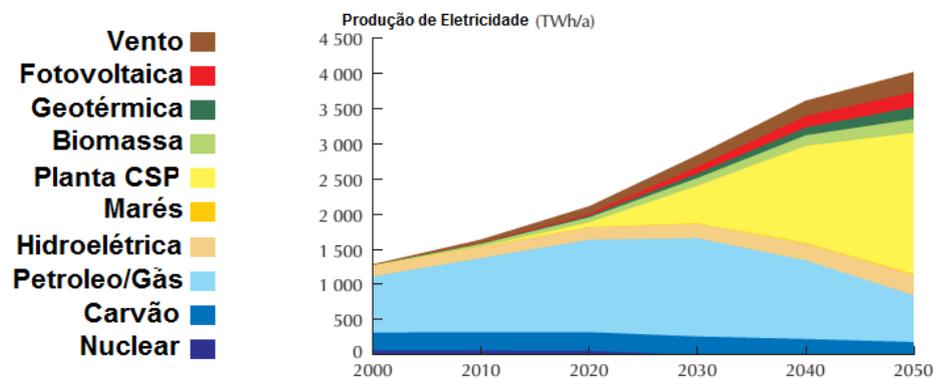


Figura 4. Projeção de geração de eletricidade de 2000 a 2050 composição em 2050 com o MENA (Médio Oriente Médio e Norte de África) e os países do sul Europeu.

Fonte: Adaptado de (IEA, 2011b).

O processo de conversão da energia solar em energia elétrica por concentradores solares consiste em concentrar os raios solares em um único ponto, que pode ser feito de diversas formas com diferentes tipos de concentradores. Neste ponto há ou uma tubulação com um fluido térmico, que irá absorver esse calor o qual é transferido à água que se transforma em vapor. O vapor movimentam turbinas que movimentam geradores. Uma vantagem deste método de conversão é a maior facilidade em armazenar a energia quando se comparada com o método fotovoltaico. Onde a armazenagem de energia térmica é feita através do aquecimento de fluidos térmicos, que são mais simples baratos e possuem maior vida útil quando se comparado com as baterias que é o método de armazenagem de energia térmica. A energia térmica pode ser armazenada por alguns dias, para manter a produção de energia durante a noite, ou períodos com alta nebulosidade (DIENSTMANN.G.2009).

A Figura 5 mostra a estrutura esquemática de uma usina termossolar concentradora, e cada uma das suas 3 partes principais. O primeiro estágio é composto pelas placas termossolares que transferem o calor do sol para o líquido. O segundo estágio contém o sistema de armazenagem e fonte de calor auxiliar, neste ponto é armazenada parte da energia absorvida pelos painéis para os períodos que não há irradiação solar, e caso o estoque de energia térmica acabe e seja necessário manter a usina operando pode ser acionado a fonte de calor auxiliar que usa energia fóssil com fonte de energia. O terceiro estágio é onde o calor do fluido é convertido em vapor superaquecido com alta pressão, que move as turbinas que move os geradores de energia elétrica (DIENSTMANN.G.2009).

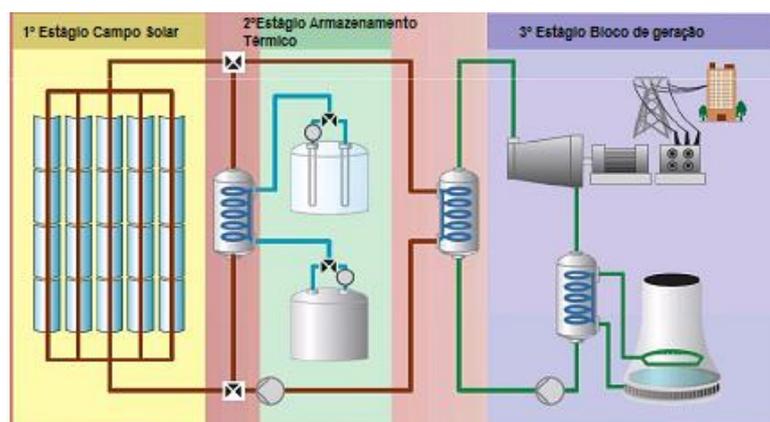


Figura 5. Diagrama esquemático de uma usina com acumulação térmica.

Fonte: Adaptado de (IEA, 2010c).

1.2.2 Energia Solar Fotovoltaica

Outra forma de converter energia solar em energia elétrica que está experimentando um grande crescimento é a geração fotovoltaica. Até o início do terceiro milênio (EPIA, 2014) a tecnologia era utilizada majoritariamente em sistemas isolados, passou para uma situação em que 95% dos sistemas são conectados a rede elétrica (SFCR). Este grande crescimento foi resultado do incentivo a esta forma de geração como visto na Figura 6, promovidos principalmente por países como a Alemanha, Austrália, China, Espanha, EUA entre outros. Os custos dos sistemas de geração fotovoltaico reduziram-se com este aumento conforme mostrado na Figura 7 e a capacidade instalada aumentou no mundo conforme verificado na Figura 8. Os custos da energia solar fotovoltaica tiveram uma redução, pois ao investir no desenvolvimento tecnológico do setor, ocorre o aumento da experiência com esta tecnologia gerando alternativas tecnológicas de fabricação menos complexas além das diminuições dos custos de se trabalhar com maior escala de produção. Para países como a Alemanha, investir em geração própria e independente de energia elétrica gera uma menor dependência política, pois parte da sua energia é originária de termelétricas abastecidas com gás natural proveniente da Rússia, cujos os dutos de transporte passam por regiões de instabilidade política como a Ucrânia. Além disso, o investimento em tecnologia promove o desenvolvimento dos países (EPE, 2012).

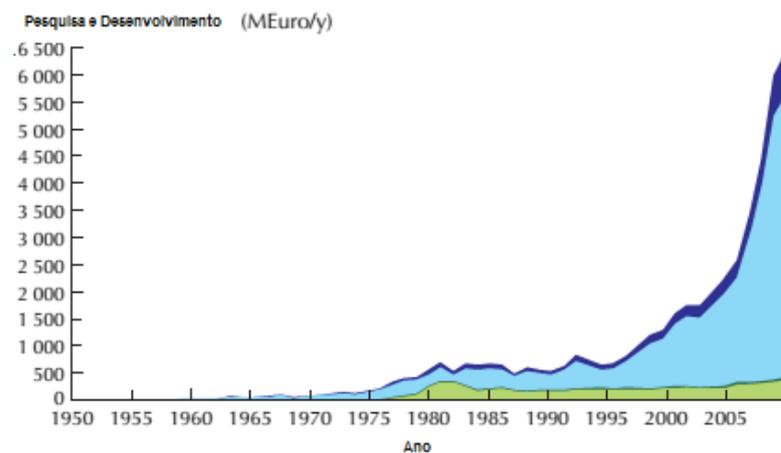


Figura 6. Investimentos público e privado em milhões de euros em P&D para fabricação de PV.

Fonte: Adaptado de (IEA 2011b).

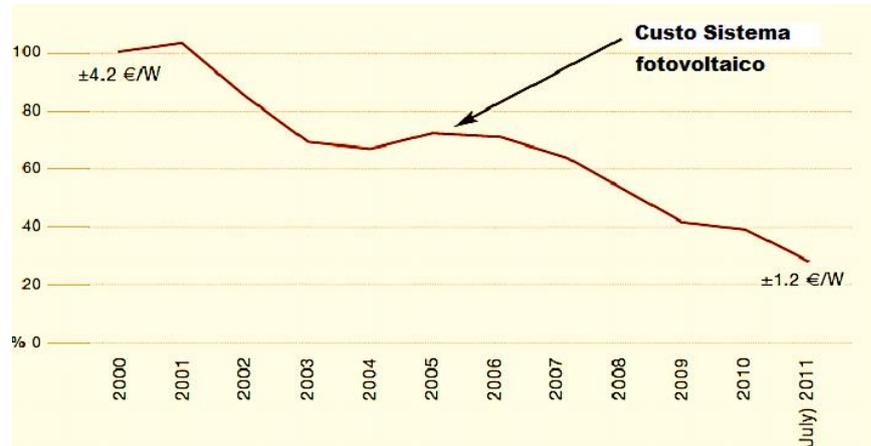


Figura 7. Preços de sistemas fotovoltaicos na Europa.

Fonte: Adaptado de (EPIA, 2012)

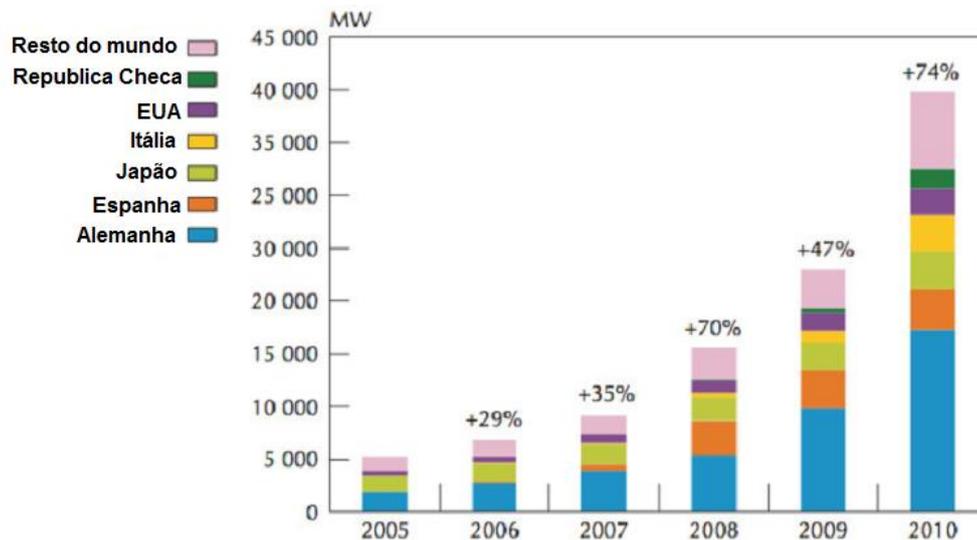


Figura 8. Capacidade instalada de painéis fotovoltaicos pelo mundo.

Fonte: Adaptado de (IEA 2011b).

Um dos fatores que mais contribuiu para a diminuição dos custos de produção de eletricidade fotovoltaica foram os altos investimentos cujos dados estão demonstrados na Figura 6, que tiveram um salto no ano de 2005, com a atração do corpo técnico dos principais fabricantes de equipamentos eletrônicos para desenvolver tecnologias de fabricação para o setor. Especialmente nos equipamentos utilizados na geração distribuída, onde os principais gargalos eram o custo do inversor e das placas, estes passaram por um avanço tecnológico no processo de fabricação em larga escala além do desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação.

1.2.2.1 Sistemas de geração de energia elétrica fotovoltaico

Além do aproveitamento térmico da energia solar para aquecimento de água, e da geração de energia elétrica através de concentradores solares (CSP), outra forma de aproveitar diretamente a energia solar é utilizando a geração fotovoltaica. Que é baseada no efeito fotovoltaico ocorrido devido à junção de materiais chamados semicondutores formando com a junção exposta uma célula solar. Ao se expor a junção destes dois materiais à radiação luminosa ocorre uma diferença de potencial, e caso sejam feitas as conexões em circuito, haverá circulação de corrente elétrica e por consequência geração de energia elétrica. (TOLMASQUIN 2003). Uma única célula solar é capaz de gerar 0,5 a 0,6 V e potência entre 1,0 e 1,5 W de energia, que para uso prático de geração as células devem ser arranjadas em ligações série-paralelo constituindo módulos (painéis) de pequena potência hoje em torno de 250 W, com tensão entre 12 ou 24 V.(EPE, 2012).

1.2.2.2 Sistemas isolados

A composição básica de um sistema de geração e uso de energia elétrica com geração fotovoltaica é composta por 5 elementos básicos que podem ser vistos na Figura 9 (CRESESB, 2008):

Painel fotovoltaico: Converte a radiação luminosa do sol incidente sobre seu plano, em energia elétrica, em corrente contínua 12 V ou 24 V.

Controlador de carga: Tem por finalidade controlar a carga da bateria. Através de uma chave de ligação direta com a bateria, que liga ou desliga o fluxo de energia proveniente dos painéis para o carregamento da bateria conforme programado. Visando aumentar a vida útil da bateria, onde sua conexão esquemática pode ser observada no diagrama de blocos da Figura 10. O controlador é composto basicamente por dois circuitos: um circuito de controle e um de comutação. O primeiro monitora as variáveis do sistema, como tensão, corrente e temperatura da bateria; e usa estas informações para comandar o circuito de comutação. O circuito de comutação é composto por chaves semicondutoras que controlam a tensão e/ou corrente de carga ou descarga das baterias (PROSTAR, 2012). (SOLENERG, 2014).

Baterias: São elementos que armazenam energia. Com o seu uso é possível alimentar cargas em condições nas quais não ocorre produção de energia nos painéis solares. Este fato acontece, por exemplo, à noite, ou em dias em que o clima está chuvoso ou nublado.

Inversor: A maior parte das cargas elétricas utilizadas hoje como televisores, geladeiras, motores, devem ser alimentadas em corrente alternada (CA) 110/220 V. A saída do painel solar fotovoltaico tem como característica ser em corrente contínua (CC) de 12 a 24 V, para poder utilizar os sistemas fotovoltaicos isolados, neste tipo de aplicação se faz necessário à utilização de inversores, este elemento faz isto por intermédio de circuitos geradores de sinal PWM, que controlam o acionamento de tiristores ou transistores de potência. Para outras possíveis aplicações que possam utilizar a corrente contínua (CC) em 12 ou 24 V se dispensa o uso deste equipamento (CAMUS, 2006).

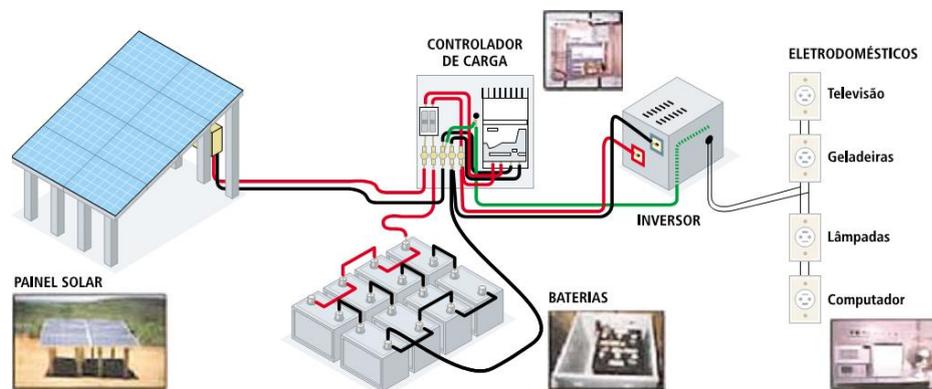


Figura 9. Composição de um sistema de geração de energia elétrica isolada.

Fonte: (CRESESB, 2000)

Este tipo de sistema se aplica principalmente a situações em que a instalação de energia elétrica conectada ao sistema interligado nacional (SIN) não é economicamente viável, ou sem acesso. Este sistema é uma alternativa mais vantajosa para o fornecimento de energia, dentre as principais aplicações pode-se citar (ARAMIZU, J. 2010):

- Fornecimento de energia elétrica para comunidades remotas, que se encontram distantes da rede elétrica, ou o acesso é restrito;
- Bombeamento de água;
- Irrigação;
- Fornecimento de energia para estações remotas de telecomunicações, telemétrica e para embarcações;
- Iluminação pública de estradas, parques, praças;
- Alimentação de telefones públicos em estradas e comunidades rurais;
- Cercas elétricas;

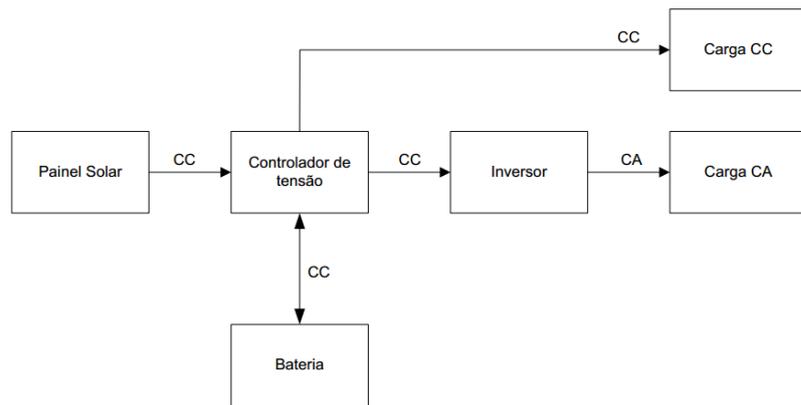


Figura 10. Diagrama de blocos de um sistema de geração de energia elétrica isolado.

Fonte: (ARAMIZU, J. 2010).

1.2.2.3 Sistemas conectados a rede

Outra possibilidade do uso da energia proveniente de sistemas fotovoltaicos é sua interligação com a rede elétrica ou Sistema Interligado Nacional (SIN). Tecnologia aprimorada nos últimos anos pelos maciços investimentos em P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) tanto em inversores como na fabricação dos painéis fotovoltaicos. Uma das vantagens da geração distribuída, assim como nos programas de incentivo ao uso eficiente da energia, é a possibilidade de diminuir a necessidade de ampliação tanto da geração como da distribuição do Sistema Interligado Nacional (SIN). Além de diminuir a pressão das variações climáticas sobre a capacidade do sistema suprir a sua demanda por energia (EPE, 2014).

Um sistema fotovoltaico conectado a rede trabalha convertendo a energia solar em eletricidade e injetando a energia gerada diretamente a rede de distribuição. O sistema *on-grid*, depende da rede para funcionar, portanto caso ocorra o desligamento da rede o mesmo será imediatamente desligado, não funcionando como sistema backup. Isto é necessário também, pois em caso de manutenção a rede não pode estar energizada (EPE, 2014).

O equipamento que possibilita fazer este tipo de trabalho é um inversor mais sofisticado que os utilizados em sistemas autônomos, o inversor *Grid-Tie*. Este é capaz de se interligar com a rede da concessionária devido a sua capacidade de se sincronizar com a mesma em 60 Hz (frequência da rede no Brasil), e sua tensão com a rede que se deseja conectar, além de se desconectar na falta da mesma. Dentre outras várias funções que este inversor possui: em seu controle interno de tensão e corrente há um algoritmo de controle que visa sempre manter os níveis de corrente e tensão do painel no nível de potência máximo

possível no momento, além dos controles de temperatura interna e ponto de corte de geração (EPE 2014). (ARAMIZU, J. 2010).

1.3 DINÂMICA DOS FLUXOS DE ENERGIA ENTRE UNIDADE CONSUMIDORA/GERADORA E REDE DA CONCESSIONARIA.

A grande vantagem é de dispensar o uso de sistemas de armazenamento por baterias, que são um grande inconveniente que limita o uso da tecnologia fotovoltaica solar, o que diminui os custos com a instalação do sistema e praticamente elimina os custos de manutenção, pois não há sistema de armazenagem. E aliado à diminuição dos custos de fabricação dos inversores, vem para viabilizar o seu uso em locais em que antes não era vantajoso fazer o aproveitamento deste recurso, principalmente em residências e edifícios comerciais e habitacionais, onde a tarifa de energia elétrica é maior, o que proporciona um tempo menor do retorno do investimento (ARAMIZU, J. 2010).

Devido ao fato de não necessitar de sistema de armazenamento, a rede elétrica age como carga absorvendo a energia elétrica, e como sistema de armazenamento. Assim a energia excedente que não é utilizado dentro da residência é enviada para rede para suprir a demanda de outros consumidores atendidos pela rede da concessionária. A energia excedente se torna, para a unidade residencial consumidora/geradora, crédito (ou armazenamento virtual) de energia para ser utilizado pelo consumidor no mesmo local ou outro local de mesmo proprietário (EPE, 2014). Pode se considerar como se o sistema utiliza-se a rede elétrica para armazenar a energia excedente gerada, assim, por exemplo, diminuído a demanda por energia elétrica por parte das hidrelétricas durante o período do dia, e a noite quando não há geração a unidade geradora/consumidora, passa a consumir essa energia que fora economizada na hidrelétrica durante o dia. No Brasil, esta possibilidade de uma unidade consumidora poder passar a ser unidade consumidora/geradora foi regulamentado primeiramente pela resolução normativa n°482 de 2012 (ANEEL,2012). A Figura 11 ilustra esta dinâmica energética ao longo de um dia comum de boa produção.

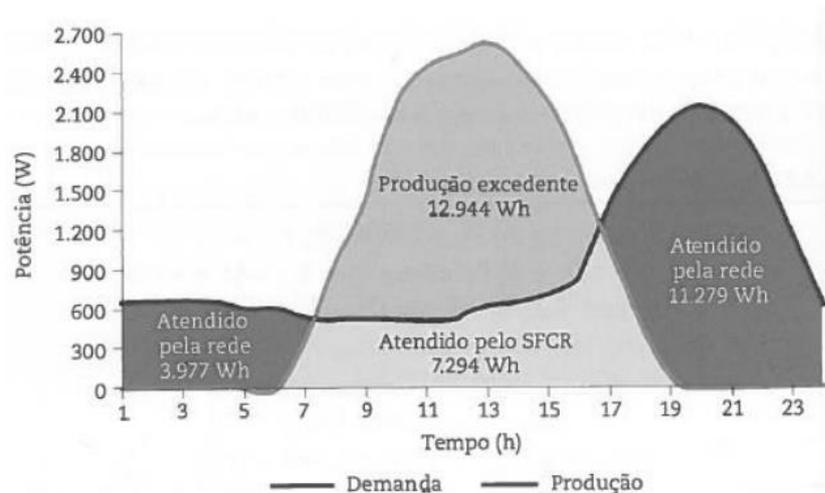


Figura 11. Comparação da curva de geração fotovoltaica típica e da curva de carga residencial típica.

Fonte: EPE (2014).

1.4 REGULAMENTAÇÃO

Devido ao fato dos sistemas de geração *on-grid* serem conectados à rede de distribuição das concessionárias, seu uso deve ser regulamentado pelos órgãos responsáveis, no caso do Brasil a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL que aprovou em abril de 2012 a Resolução Normativa N° 482 (ANEEL, 2012), de Janeiro de 2012. Criando e estabelecendo a regulamentação necessária para que os consumidores de energia elétrica possam também ser geradores de energia elétrica. Esta regulamentação abre um novo horizonte e incentivo para produção de energia fotovoltaica no Brasil.

Os procedimentos de acesso e instalação devem seguir normas estabelecidas pela concessionária que são aprovadas pela ANEEL, tendo como finalidade fazer o controle da qualidade e padronização tanto dos painéis, inversores e composição do circuito, visando à segurança e o máximo de eficiência e confiabilidade do sistema no processo de geração. Onde somente é autorizado o uso tanto de inversores como painéis aprovados e homologados pela concessionária, ou órgão de controle regulamentador que no caso do Brasil é o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia), a primeira concessionária a elaborar uma norma técnica específica para o procedimento de acesso foi a COPEL do Paraná através da norma técnica Copel NTC905200 (2014).

Comparando a geração pelos sistemas fotovoltaicos conectados à rede em relação à geração de energia elétrica em usinas CSP, a geração em larga escala podendo ser substituída

pela distribuída em menores empreendimentos, além de que os painéis fotovoltaicos geram uma considerável quantidade de energia mesmo em dias com menor irradiação e ou radiação difusa. Fato não ocorrido em sistemas concentradores que necessitam de radiação direta para efetuar a conversão (DIENSTMANN. G. 2009). Assim este sistema é mais adequado para aproveitar o recurso energético solar em regiões habitacionais.

A composição do sistema de geração distribuída é mostrada na Figura 12, onde é possível observar como ocorre o processo. A energia gerada pelos painéis fotovoltaicos é enviada até o inversor *Grid-Tie* que ao receber esta energia a envia para a rede sincronizando-a com a mesma (SILVA, 2015). O sistema deve conter ainda o medidor de consumo bidirecional, que faz os registros do quanto foi gerado e o quanto foi consumido pela residência, para poder mensurar quanto foi o excedente gerado pela unidade consumidora-geradora. O sistema deve contar com um quadro elétrico com disjuntor que seccione o acesso do ramal gerador ao barramento do padrão de entrada da concessionária conforme no Paraná a Norma Técnica Copel NTC 905200. Para eventuais manutenções e segurança do sistema, neste mesmo quadro, a título de monitoramento, pode conter equipamentos de medição para estudos do comportamento do sistema. O diagrama de blocos que ilustra o processo é mostrado na Figura 13, onde o sistema de geração de energia solar conectada a rede é basicamente um ramal de geração de energia dentro do quadro de distribuição da residência.

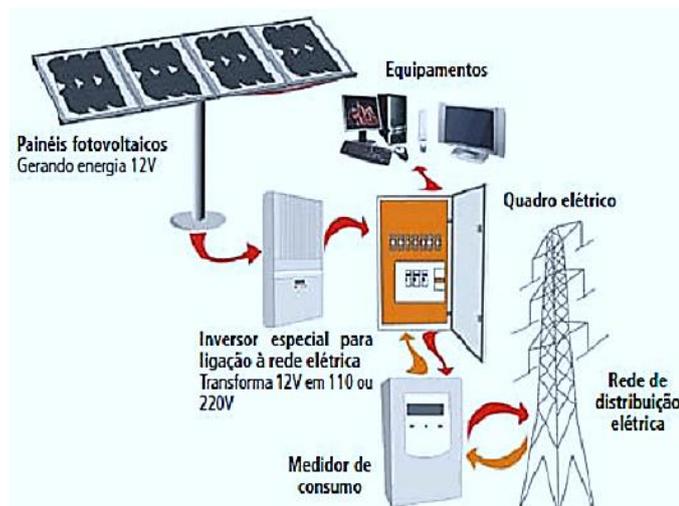


Figura 12. Sistema solar interligado na rede da concessionária.

Fonte: Silva (2015).

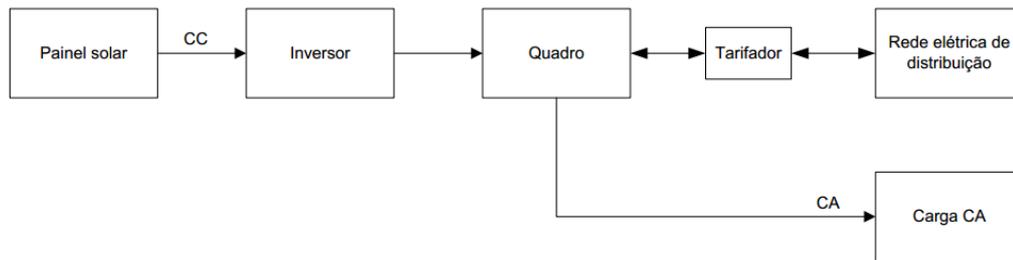


Figura 13. Diagrama de blocos de um sistema de geração de energia elétrica distribuída.

Fonte: (ARAMIZU, J. 2010).

1.5 POTENCIAL FOTOVOLTAICO DISTRIBUÍDO RESIDENCIAL BRASILEIRO

Como visto no Capítulo 1 a geração de energia elétrica no Brasil é majoritariamente hidroelétrica, mas se observa que está crescendo a geração termoelétrica com gás natural pelo fato de terem ocorrido estiagens que diminuíram o potencial hidroelétrico nos últimos anos.

Com a evolução dos sistemas de geração distribuída por painéis solares instalados nos telhados residenciais associado ao uso de inversores Grid Tie, abre-se uma enorme possibilidade para o Brasil aumentar dentro de sua matriz energética a geração de energia solar, e diminuir a dependência das hidroelétricas, abrindo espaço para o investimento particular na geração de energia elétrica.

Um dos maiores incentivos para esta expansão foi a regulamentação pela Resolução Normativa nº 482 de 2012 (ANEEL, 2012), que regulamenta e estabelece as condições gerais para instalação de micro e mini geração distribuída no país, assim como o sistema de compensação de energia elétrica, onde a geração de energia elétrica é feita de maneira distribuída nas residências que operam em compensação com a concessionária, acompanhando o desenvolvimento tecnológico da geração distribuída feita pelos países desenvolvidos. Neste contexto o Brasil possui um enorme potencial de geração como ilustrado na Figura 14, além de tarifas de energia elétrica em patamares equivalentes aos dos países europeus. (EPE, 2014).

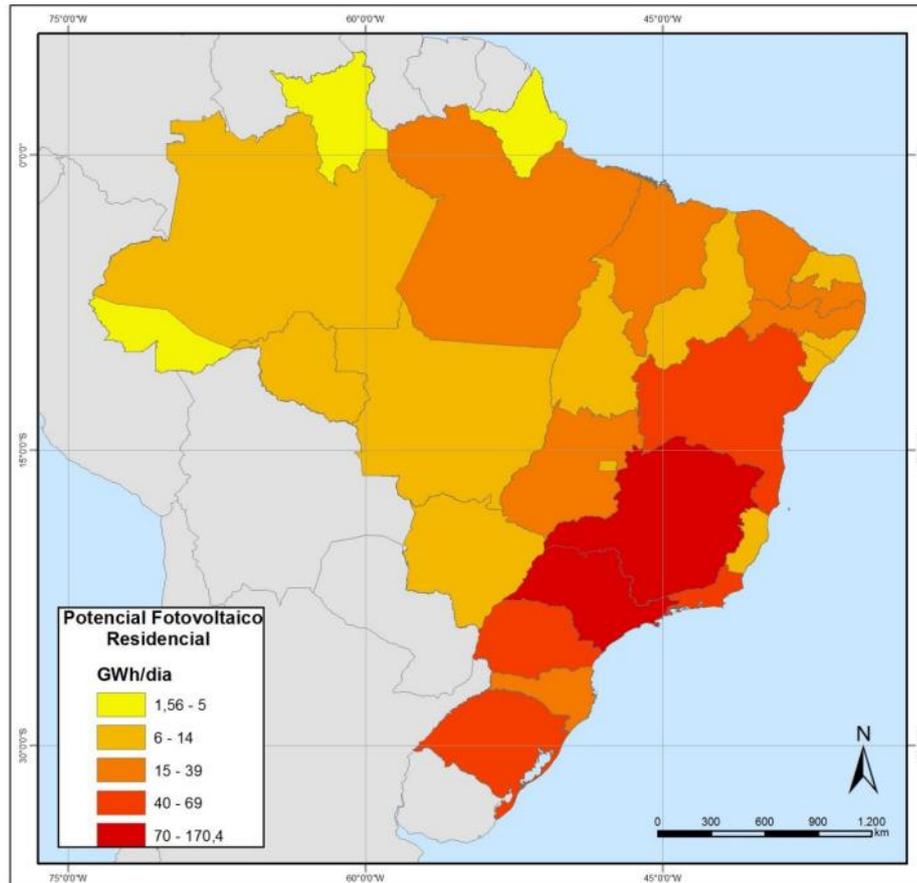


Figura 14. Potencial Técnico de geração fotovoltaica em telhados residenciais por unidade da federação (GWh/dia).

Fonte: EPE (2014).

O potencial total Brasileiro fotovoltaico residencial segundo dados de EPE (2014) é de 285,805 GWh/ano, tendo em vista que o consumo residencial em 2013 fora de 124,896 GWh/ano, verifica – se um potencial de aproximadamente de 2,3 vezes o consumo de energia, apesar desta hipótese ser pouco factível, fica claro que a área e o potencial não são o fator limitante para expansão desta tecnologias. Com o aumento do número de residências, e a evolução tecnológica do processo é possível que este potencial possa aumentar com o futuro, pode-se verificar que assim as residências passarão de apenas unidades consumidoras para também geradoras de energia elétrica.

O avanço e expansão das tecnologias de geração fotovoltaico distribuída no Brasil vão depender dos interesses econômicos e políticos do governo, além é claro, das grandes empresas; e bem como proporcionalmente quais serão as políticas públicas de incentivo fiscal e tributário além da regulamentação do governo; o interesse de investimento por parte dos proprietários das unidades consumidoras influenciado por programas de informação sobre o

processo; também da evolução dos custos de fabricação dos componentes utilizados, da variação da tarifa de energia elétrica influenciada pela variação do clima e impostos, que tornem mais ou menos favoráveis o uso da energia solar fotovoltaica, que por fim vão determinar o tempo de retorno do investimento. (ARAMIZU, J. 2010). (GOLDENBERG, MOREIRA, 2005).

1.6 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS:

As principais características elétricas básicas principais segundo (CRESESB, 2014) são:

- V_{oc} (tensão de circuito aberto): Tensão entre os terminais de uma célula/módulo ou gerador fotovoltaico, quando a corrente em seus terminais é nula;
- I_{sc} (Corrente de Curto-Circuito): Corrente que circula por uma célula/modulo ou gerador fotovoltaico, quando a tensão em seus terminais é nula;
- P_m (Potência máxima): Ponto da curva corrente *vs* tensão para o qual o produto tensão x corrente apresenta o seu valor máximo;
- V_{mp} (Tensão de potência máxima): Tensão que produz o ponto da curva corrente *vs* tensão de máxima potência;
- I_m (Corrente de potência máxima): É a corrente que produz o ponto da curva corrente *vs* tensão de máxima potência;

Estes são os componentes que caracterizam, em uma plotagem em forma de gráfico dos valores mensurados e calculados, a curva característica do painel como ilustrado nas Figuras 15 e 16 que ilustram as curvas de corrente e potência de um painel separadamente mostrando os pontos característicos de V_{oc} , I_{sc} , P_m e V_{mp} . Estes parâmetros são obtidos mensurando-se corrente e tensão ao se ligar em paralelo na saída do painel, um resistor de carga com resistência variável, onde sobre condições de um dia de céu limpo ao ponto do dia de máxima radiação ou que proporcione irradiação solar global de 1000 W. m^{-2} . (CRESESB, 2014).

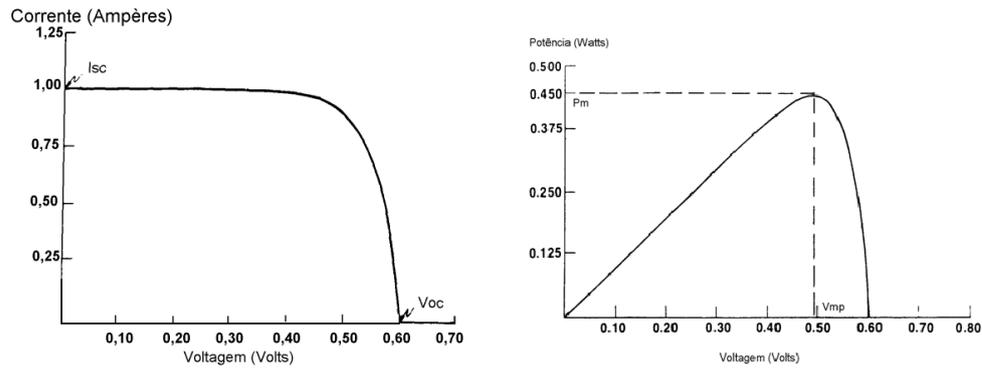


Figura 15. Curvas característica de $I \times V$, mostrando I_{sc} e V_{oc} , e curva típica de potência vs Tensão.

Fonte: (CRESESB, 2014).

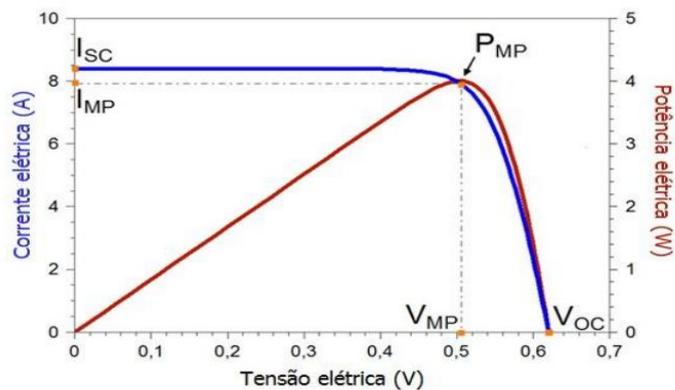


Figura 16. Curva característica de um painel, destacando ponto de potência máxima.

Fonte: (CRESESB, 2014).

1.7 EFEITO IRRADIAÇÃO SOLAR.

Na Figura 17 é possível visualizar o efeito da variação da irradiação sobre a curva I-V de um painel fotovoltaico a temperatura constante de 25°C . Observa-se que a corrente elétrica aumenta linearmente com o aumento da irradiação solar incidente, enquanto que a tensão de circuito aberto aumenta logarithmicamente caso mantida a temperatura constante. (CRESESB, 2014).

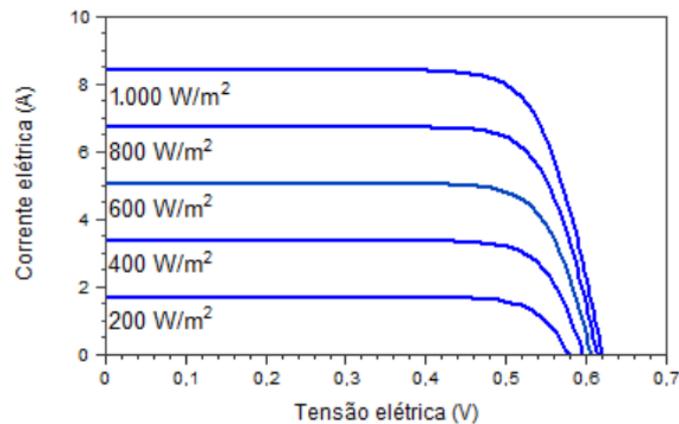


Figura 17. Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25°C.

Fonte: (CRESESB, 2014).

1.8 EFEITO DA TEMPERATURA

As variações de irradiação incidente e temperatura ambiente modificam a temperatura de operação da célula fotovoltaica. A Figura 18 mostra diversas curvas I-V para uma irradiação solar constante de 1000 W/m². Com o aumento da irradiação incidente sobre a placa ou temperatura ambiente há um aumento da temperatura da placa, resultando num efeito negativo de redução da eficiência. O aumento da temperatura leva a uma diminuição considerável da tensão do painel e um aumento desprezível da corrente, com a diminuição da tensão ocorre à diminuição da potência máxima.

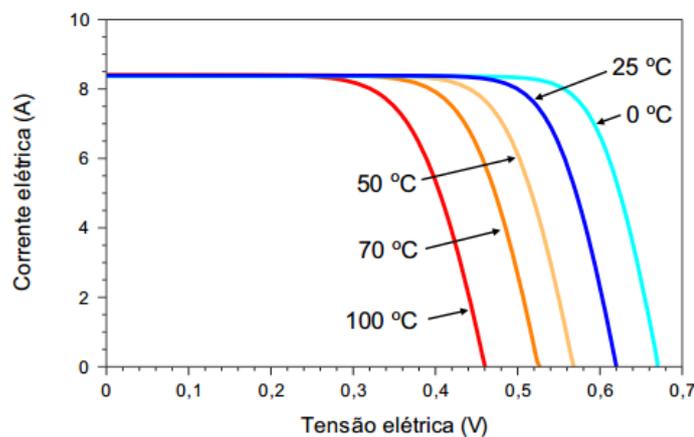


Figura 18. Influência da variação da temperatura da célula fotovoltaica solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino a uma irradiação solar constante de 1000 W/m².

Fonte: (CRESESB, 2014).

1.9 EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A temperatura e a irradiação solar são os dois principais fatores que influenciam na produção de energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos. A corrente que o painel fotovoltaico gera varia linearmente com a irradiância, enquanto que a tensão varia logaritmicamente. Observa-se que com o aumento da irradiação, aumenta a temperatura da célula e tende a diminuir a sua eficiência. Este fenômeno ocorre por que em células solares a tensão diminui significativamente com o aumento da temperatura, e a corrente tem um pequeno aumento de valor desprezível. (PALZ 1995).

De acordo com dados de GNOATTO (2003) um modulo fotovoltaico tem um decréscimo de tensão no circuito aberto de (80 ± 10) mV, e a potência máxima de pico diminui $(0,5 \pm 0,05)\%$ para cada 1°C de aumento na temperatura na curva característica do painel.

GXASHEKA, VAN DRY & MEYER, 2005 avaliaram o desempenho dos parâmetros que afetam a geração em 5 modelos de painéis fotovoltaicos em ambiente controlado, observando os efeitos da temperatura, constataram que tanto a tensão e a potência decaem com o aumento da temperatura (Figura 19 e 20).

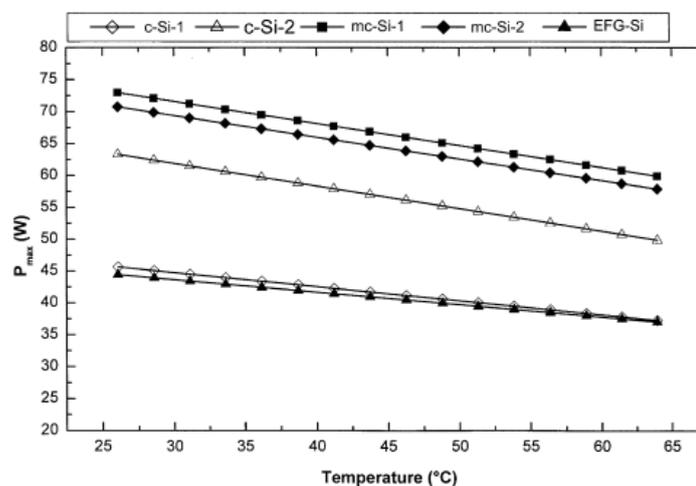


Figura 19. Influência da temperatura na potência gerada em cinco painéis fotovoltaicos.

Fonte: GXASHEKA, VAN DRY, MEYER (2005).

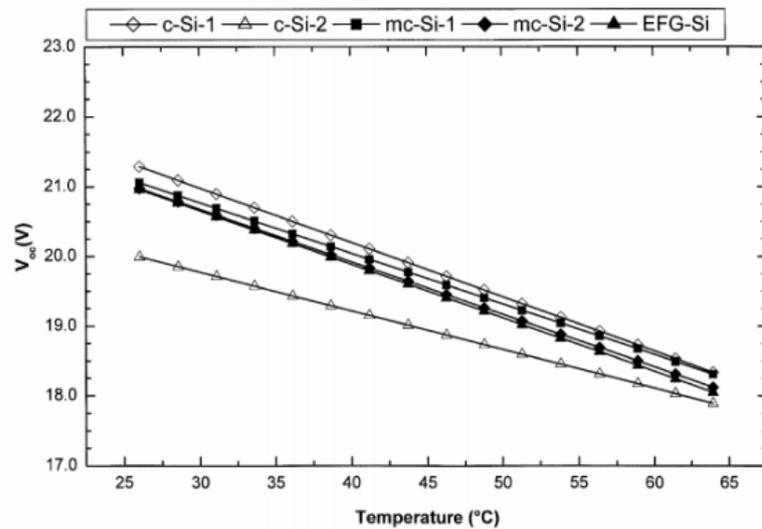


Figura 20. Influencia da temperatura na Tensão de saída em cinco painéis fotovoltaicos.

Fonte: GXASHEKA, VAN DRY, MEYER (2005).

No estudo realizado por (GNOATTO et. al., 2008) foi analisada a eficiência de um conjunto fotovoltaico, com células de silício policristalino, em condições reais de campo em Cascavel-PR, e observou-se que a eficiência do painel fotovoltaico aumenta com a diminuição da temperatura, as médias mensais de eficiência oscilaram de 8,65 a 9,17%, e a média anual foi de 8,84%.

SANTOS & MICHELS, 2011 Realizaram um estudo do desempenho de um sistema fotovoltaico policristalino utilizado para bombeamento de água com dois painéis de 56 W cada, analisando o efeito da irradiação e da temperatura coletando dados de maneira simultânea, instalado em Medianeira/PR. Observaram que o aumento da temperatura de 25°C para 40°C, dos painéis, a potência de saída diminuiu em um valor absoluto médio de 5,55 %, e por consequência a vazão da bomba reduziu numa média de 4,23%.

ABDOLZADEH & AMERI, 2009 desenvolveram um sistema para pulverizar água sobre as células fotovoltaicas para diminuir a temperatura das mesmas, visando melhorar a eficiência do sistema fotovoltaico. Analisando o desempenho de um sistema fotovoltaico utilizado para bombeamento de água de 225 W, constataram que a pulverização de spray de água aumentou a eficiência média da célula fotovoltaica em 3,23% e a eficiência total do sistema em 1,35%, comprovando que o aumento da temperatura diminui a eficiência do sistema de bombeamento.

S. Nižetić, et al., 2015 estudou o efeito do resfriamento com aspensão de água sobre um painel fotovoltaico, em três posições, na parte inferior, na parte superior e nas duas

posições simultaneamente. Sem resfriamento a temperatura do painel ficou em 52°C, com resfriamento na parte inferior ficou em 33.7°C na parte superior ficou em 29.6°C, e com resfriamento simultâneo (superior e inferior) ficou 24.1°C. Onde ao analisar o comparando do aumento relativo da potência em relação ao painel em situação sem resfriamento que estava em 52°C, foi de 14% para 33.7°C, de 14.6% para 29.6°C e 16.3% para 24.1°C.

ILHAN CEYLAN, et al.,2013 estudaram o efeito do resfriamento proporcionado pela instalação de uma tubulação em forma de serpentina na parte inferior de um painel fotovoltaico, instalada dentro de um circuito térmico compondo um sistema de pré-aquecimento para um coletor termossolar de placa plana, constituindo assim um sistema PV-T (fotovoltaico, termossolar), onde nos momentos que ocorreu a circulação de água a temperatura do painel teve uma redução de 55°C para 45°C em sua temperatura, esta redução na temperatura proporcionou um incremento de 3% no valor absoluto da eficiência, ao longo do período de um dia sem contar a energia térmica absorvida pela serpentina, foi observado também que nos dias em que o sistema de resfriamento não foi acionado as eficiências de pico não ultrapassaram 10% enquanto que nos dias em que houve resfriamento as potencias de pico oscilaram entre 12-16%.

Visando diminuir o efeito do superaquecimento de painéis fotovoltaicos (K.A. Moharram, et al., 2013) montou um sistema de aspersão de água sobre a superfície de seis conjuntos de painéis fotovoltaicos. Para avaliar o potencial técnico de utilização desta forma de resfriamento, efetuou-se períodos de acionamento intermitente nas horas de maior irradiação solar que é o período das 11 as 14 hs, o sistema foi acionado durante 5 minutos a cada intervalo de 15 minutos, para verificar o efeito do resfriamento sobre a energia gerada e a eficiência. Onde se pode constatar que ocorreu uma redução de 10°C, reduzindo de 47,5°C para 37,5°C, e esta diminuição de temperatura proporcionou um aumento de 12,5% na eficiência relativa do conjunto, verificando que esta forma de resfriamento proporcionou resultado satisfatório em resolver o problema do superaquecimento.

1.10 OBJETIVO

Tendo em vista a promissora expansão da geração fotovoltaica no Brasil, e sabendo que o superaquecimento é um dos principais fatores que afeta negativamente geração de painéis fotovoltaicos, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do resfriamento com água de um painel no desempenho energético em um sistema distribuído conectado a rede interna de uma residência.

Resultados esperados:

A fim de fornecer informações técnicas de desempenho acerca do efeito do resfriamento sobre o desempenho do painel em condições reais do clima de Cascavel – PR, este estudo poderá ser utilizado em projetos, instalações, manutenção e estudos futuros que envolvam conjuntos de painéis fotovoltaicos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

2.1.1 Delineamento da coleta do efeito do resfriamento sobre o desempenho sobre um conjunto de painéis conectado a rede interna de uma residência:

A coleta dos dados para verificar estes efeitos se deu em 3 períodos de 2 dias cada, tomou-se o cuidado de realizar estas coletas em dias com alta irradiação solar incidente, isto ocorre geralmente próximo do solstício de verão que é no dia 21/dez (SOUZA et.al, 2010) (período do ano caracterizado por apresentar os maiores níveis de irradiação solar incidente no hemisfério Sul).

2.1.1.1 Período 1. Período de coleta com resfriamento intermitente programado

Ao longo do primeiro período de dois dias que ocorreu em 17 e 18/12/2015, em quatro momentos destes dias acionou-se o sistema de aspersores posicionados na parte inferior da placa, visando resfriar o painel, e verificar o efeito do resfriamento sobre as variáveis monitoradas.

O resfriamento foi programado para ocorrer em quatro momentos, às 12:00h, 13:00h, 14:00h e 15:00hs, horários do dia que apresentam normalmente altos valores de irradiação solar e temperatura ambiente. O tempo de duração do acionamento dos sistemas de aspersão, visando o resfriamento, foi estipulado em 15 minutos a partir da hora programada de início, este tempo foi estipulado com base na metodologia aplicada por (K.A. Moharram, et al., 2013) para verificar o efeito do resfriamento intermitente sobre a eficiência de painel. A Tabela 3 ilustra o delineamento experimental de acionamento do sistema.

Tabela 3. Cronograma descritivo do acionamento do sistema de aspersão.

Horário	12:00	12:15	13:00	13:15	14:00	14:15	15:00	15:15
Ação	Ligar	Desligar	Ligar	Desligar	Ligar	Desligar	Ligar	Desligar

2.1.1.2 Período 2. Período de coleta sem nenhum tipo de resfriamento

No segundo período de dois dias que aconteceram nos dias 04 e 05/01/2016 não foi aplicado o resfriamento, objetivando verificar o comportamento do painel sem nenhum tipo de resfriamento.

2.1.1.3 Período 3. Período de coleta com resfriamento contínuo das 10:00hs às 18:00hs

E no terceiro período que aconteceu nos dias 07 e 08/01/2016 aplicou-se o resfriamento contínuo sobre os painéis no horário de maior nível de irradiação e temperatura do painel que vai das 10:00 hs às 18:00 nestes dois dias. Esta metodologia, de um período ser coletado sem resfriamento e outro com resfriamento, é baseada na aplicada por (ILHAN CEYLAN, et al.,2013). Visando verificar o seu comportamento nesta situação, acionou-se continuamente nos dois dias o sistema de resfriamento.

2.1.2 Dados coletados

Nestes três períodos coletaram-se os dados característicos do desempenho do sistema, como corrente, tensão, além da irradiação solar global, temperatura ambiente e temperatura da superfície inferior do painel. Coletaram-se também os dados de temperatura superficial do painel antes e depois de uma das etapas de resfriamento. Na Tabela 4 encontram-se detalhados, os sensores utilizados e quantidade utilizada para medir cada uma das grandezas.

Tabela 4. Sensores utilizados para coleta dos parâmetros analisados ao longo do período.

Parâmetro	Sensor	Qtde.
Temperatura painel	Termopar Tipo J $\pm 1^\circ\text{C}$	1
Temperatura Ambiente	Termopar Tipo J $\pm 1^\circ\text{C}$	1
Temperatura superficial	Câmera térmica	1
Irradiação solar global	Piranômetro $\pm 5\%$	1
Corrente	Resistor shunt 0,1R 5W $\pm 0,1\%$	1
Tensão	Divisor de tensão 10k / 47k $\pm 1\%$	1

2.1.3 Conjunto de painéis fotovoltaicos

Utilizou-se neste experimento 1 conjunto de 3 painéis fotovoltaicos com 22W de potência de pico cada totalizando 66W, do tipo Policristalino. As especificações técnicas dos painéis utilizados são verificadas na Tabela 5. O conjunto de painéis utilizados neste trabalho,

e o Piranômetro utilizado é visualizado na Figura 21. O conjunto se encontra instalado no Centro de Análises de Sistemas Alternativos de Energia – Casa Inteligente, dentro da UNIOESTE câmpus da cidade de CASCAVEL-PR com localização geográfica definida pelas coordenadas 24°59’ de Latitude Sul (S) e 53°27’ de Longitude Oeste (W) e altitude de 753 metros acima do nível do mar.



Figura 21. Piranômetro instalado e conjunto de painéis fotovoltaicos utilizados no experimento.

O conjunto de painéis fotovoltaicos foi posicionado e fixado em um suporte de maneira que a superfície dos painéis fique voltada para o norte geográfico, com uma inclinação de 35° correspondente a latitude local mais 10°, segundo (GNOATTO et. al., 2008) a posição neste ângulo tem a função da produção de energia ser equilibrada entre inverno e o verão.

Tabela 5. Especificações técnicas de um Painel Fotovoltaico 22 W.

Fabricante: Suntech		
Modelo número		STP022-12/D
Potência máxima nominal	(Pmax)	22 W
Corrente em P Max.	(Imp)	1.31 A
Tensão em P Max.	(Vmp)	16.8 V
Corrente de curto circuito	(Isc)	1.61 A
Tensão de circuito aberto	(Voc)	21 V
Temperatura nominal de operação da célula	(Tnoct)	50 °C
Peso		3.2kg
Dimensões		559x407x25 (mm)

Tensão máxima suportada	715 V
Corrente máxima suportada	3 A
Tipo de painel	Multi – Si (Policristalino).
Dados técnicos obtidos a condições padrões de teste	
E = 1000 W/m² T_c = 25 °C AM = 1,5	

Fonte: Suntech.

2.1.4 Sistema de resfriamento

O sistema de aspersores consiste em 3 ramais de tubulação posicionados longitudinalmente na borda superior no lado inferior da placa visualizada na Figura 22. Nesta figura é identificado também o posicionamento do sensor de temperatura da placa. Estes tubos são dotados de orifícios, onde ao ser acionada a válvula conectada a rede de água, haverá aspersão de água na face inferior da placa.

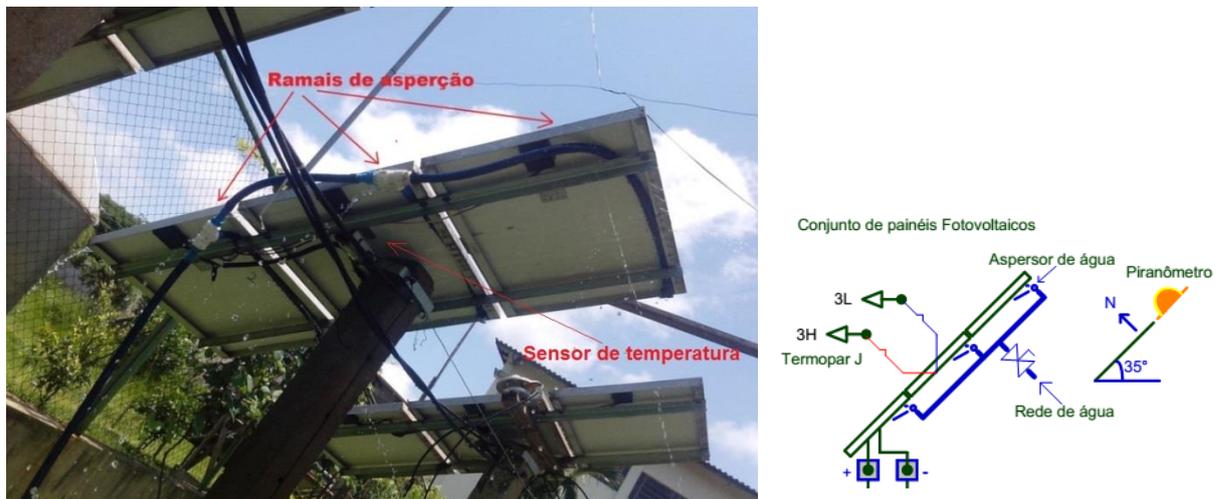


Figura 22. Sistemas de aspersores instalado e operando e esquema do posicionamento dos aspersores e ângulo de inclinação dos painéis.

Com isto haverá a troca do calor da placa para a água, e com a evaporação da água a placa irá resfriar. O acionamento do sistema é feito por meio da válvula instalada entre os ramais e a rede de água (Figura 22). A vazão de saída do sistema é 1,3 l/min. O sistema de aspersão é visualizado na Figura 22 instalado e operando.

2.1.5 Inversor de *Grid-Tie*

Para fazer a simulação de carga nos painéis utilizou-se um inversor *Grid-Tie* (Figura 23) fabricado pela empresa Masspower. O inversor converte a energia fornecida pelos painéis em 12 Vdc, para 110/220 Vac conforme a tensão fornecida pela rede, assim o inversor trabalha convertendo e sincronizando tensão e corrente com a rede, além de conter algoritmos

de controle projetados para trabalhar sempre no nível de potência máxima do painel. As especificações técnicas do inversor utilizado neste experimento são detalhadas na Tabela 6.



Figura 23. Inversor *Grid-Tie* Masspower SUN-600G-LCD.

Fonte: MASSPOWER.

Tabela 6. Especificações técnicas inversor *Grid-Tie*.

Tipo de saída:	Única
Potência de saída:	500 – 1000 W
Tipo:	DC/AC inversor
Nome do fabricante:	Masspower
Tamanho:	271 mm x 233 mm x 90 mm
Tensão de entrada	10.8V-30V
Tensão de saída:	220 V
Frequência de saída	50 Hz/60 Hz
Peso:	4 kg
Modelo:	SUN-600G-LCD

Fonte: MASSPOWER.

2.1.6 Piranômetro

Para medir a irradiação solar global incidida sobre o plano horizontal dos painéis (IGH) foi utilizado um Piranômetro da marca Kipp & Zonen, modelo CMP3, com uma sensibilidade de $15,3 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$. As Figuras 21,22 e 24 apresentam o Piranômetro instalado no mesmo plano dos painéis, e a Tabela 7 as especificações técnicas.



Figura 24. Piranômetro CMP3 instalado no plano dos painéis.

Tabela 7. Especificações técnicas piranômetro CMP3.

Dimensões	φ7,5 cm x 10 cm
Peso	543 g
Tempo de resposta 95%	18 s
Faixa Espectral	310 a 2800 nm
Sensibilidade	5 a 15,3 $\mu\text{V W}^{-1}$ m^2
Temperatura de operação	-40 °C a +80 °C
Máxima irradiância	2000 Wm^2
Precisão	±5%

Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC Cmp3-L.

2.1.7 Medições de temperatura

Para medir os dados de temperatura utilizou-se 2 termopares do Tipo J. Um termopar instalado na parte inferior do conjunto de painéis destacado na Figura 25, e o outro fora colocado na sombra do painel visando medir a temperatura ambiente ao longo dos dias do experimento.

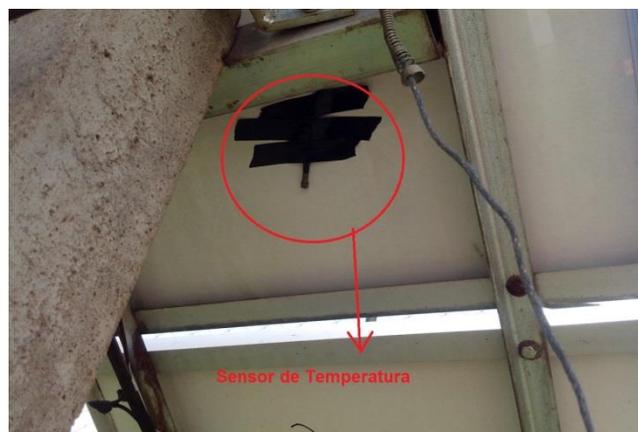


Figura 25. Termopar tipo J instalado em um dos painéis do conjunto.

2.1.8 Datalogger cr1000

Para coletar os dados de corrente, tensão irradiação e temperatura, utilizou-se 2 dataloggers, de fabricação Campbell Scientific. A coleta/programação dos Dataloggers foi feita por um computador conectado a este por intermédio de um adaptador RS-232-USB. A Tabela 8 apresenta as principais especificações técnicas do equipamento.

Tabela 8 – Principais especificações técnicas do sistema de aquisição de dados CR1000 Campbell Scientific.

Fabricante	Campbell Scientific
Modelo	CR1000
Dimensões	23,9 x 10,2 x 0,85 cm
Peso	1000 g
Alimentação	9,6 a 16 Vcc
Temperatura de operação	-25 °C a 50 °C
Entradas analógicas	8
Entradas contadoras de pulso	2
Canais de controle	3
Comunicação	1 CS I/O, 1 RS-232
Faixa leitura entrada analógica	±5 Vdc
Precisão	±0,06% (0°C a 40°C)

Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC CR1000.

2.1.9 Câmera térmica

Para mensurar a temperatura superficial dos painéis antes e depois de um dos momentos do resfriamento no primeiro período, utilizou-se uma câmera térmica multi-função IRISYS série IRY 4000, visualizada na Figura 26.



Figura 26. Câmera Térmica IRISYS 4000.

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Montagem do experimento para coleta dos dados.

Visando obter os dados para atender o objetivo de verificar o efeito do resfriamento sobre a eficiência do painel resfriamento, conectaram-se as saídas dos sensores de temperatura do painel ao Datalogger cr1000-1 de acordo com o circuito ilustrado na Figura 27, e a saída do sensor de temperatura ambiente, foi conectada ao Datalogger cr1000-2 conforme demonstrado na Figura 28. Para coletar os dados de irradiação solar global utilizou-se o Piranômetro especificado no item 2.1.6, suas ligações físicas para coleta dos dados mesurados foram feitas junto ao Datalogger cr1000-2, conforme visualizado na Figura 27.

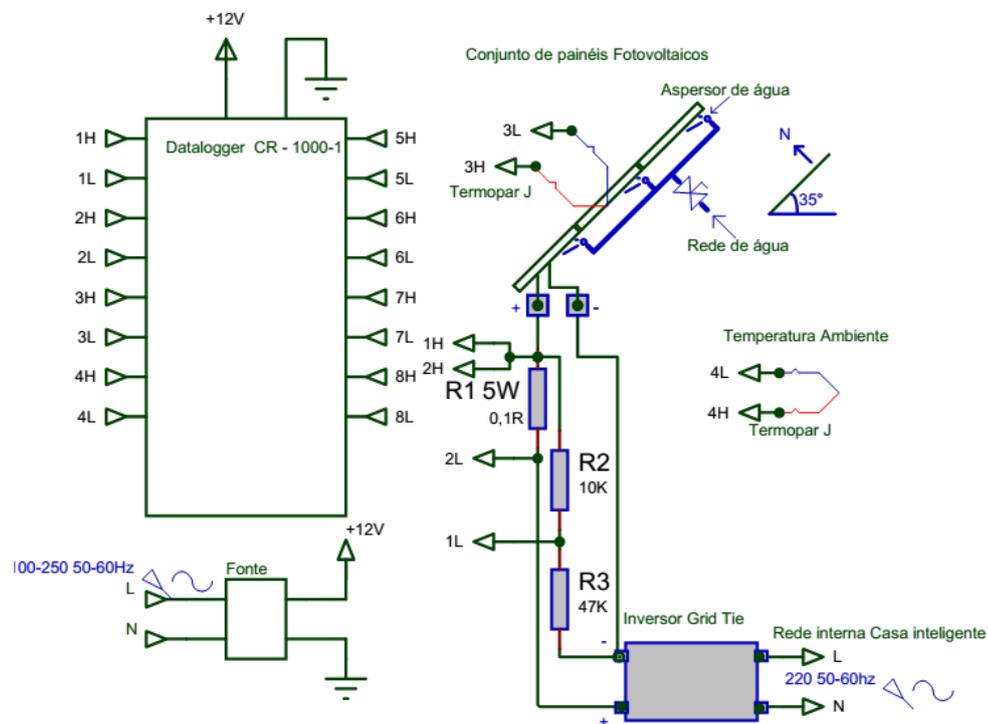


Figura 27. Diagrama de conexões físicas ao datalogger CR -1000-1

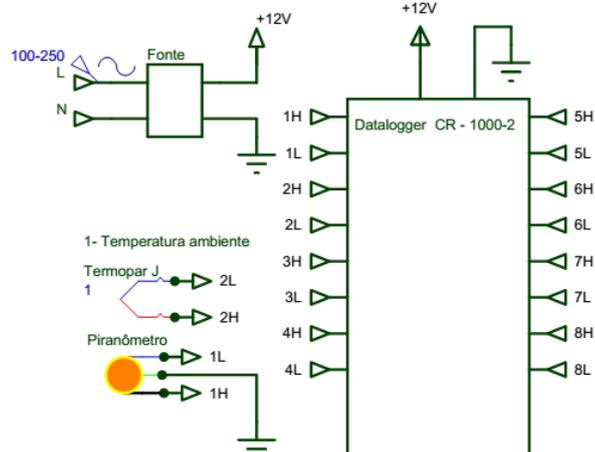


Figura 28. Diagrama de conexões físicas ao Datalogger CR -1000-2

Para coletar os dados de corrente utilizou-se um resistor *shunt* de $0,1 \Omega$ e capacidade de dissipação de $5 W$ conectado em série com a saída positiva do conjunto de painéis fotovoltaicos e seus terminais conectados aos canais analógicos do datalogger cr1000-1 é esquematizado na Figura 27, para medir a queda de tensão para posterior cálculo de corrente real com a Equação 2. Para coletar os dados de tensão de saída do conjunto, foi conectado em paralelo com o positivo e negativo da saída do conjunto, um divisor de tensão onde o ponto de conexão central foi conectado a uma das portas analógicas do datalogger cr1000-1 (Figura 27). O divisor tem uma relação de 1:5,7, com a tensão de saída do painel, por meio da equação 1 é possível calcular a tensão real. A saída do conjunto após passar pelo sistema de medição de corrente e tensão foi acoplada ao inversor *Grid-Tie*, este conectado para caráter de experimento a rede interna do Centro de Análise de Sistemas Alternativos de Energia - Casa Inteligente, que é isolada da rede fornecida pela concessionária.

2.2.2 Delineamento da frequência de coleta

Os Dataloggers para coleta dos dados, dentro de cada período, foram programados para efetuar medidas pontuais dos dados de tensão, temperatura e irradiação a cada 5 segundos, e a cada 5 minutos calcular a média aritmética destes valores observados e armazenar na memória interna, para posterior coleta e análise.

2.3 CÁLCULOS EFETUADOS

Com os dados de corrente e tensão coletados, calculou-se a potência elétrica gerada a cada 5 minutos por meio da Equação 3, a partir dos dados de potência calculou-se também a eficiência do conjunto a cada 5 minutos com a Equação 4.

Tensão real

$$V = \frac{(Vsd * 5,7)}{1000} \quad (1)$$

Onde:

V = Tensão de saída painel(V);

Vsd = Tensão saída divisor de tensão (mV);

Corrente real

$$I = \frac{Vsc}{100} \quad (2)$$

Onde:

I = Corrente real (A);

V_{cs} = Tensão de saída corrente resistor *shunt* (mV);

2.3.1 Parâmetros calculados para análise:

Potência

O cálculo da potência gerada pelos painéis foi obtido utilizando a Equação 3:

$$P = I \times U \quad (3)$$

Onde:

P = Potência elétrica (W);

I = Corrente elétrica (A);

U = Tensão elétrica (V);

Eficiência

A eficiência do conjunto de painéis fotovoltaicos conectado a rede, foi obtida através razão da potência gerada pelo conjunto, e a potência útil solar incidida, que é obtida através do produto da irradiação solar global mensurada pelo piranômetro e a área útil do painel, e o resultado desta operação é multiplicado por 100 para obter o valor em percentual (ILHAN CEYLAN, et al.,2013).

$$n = \frac{I \times U}{I_s \times A} * 100 \quad (4)$$

Onde:

n = Eficiência (%);

I = Corrente (A);

U = Tensão (V);

I_s = Irradiação Solar Global (W/m^2);

A = Área Útil do módulo (m^2);

Diferença (%) da eficiência:

A diferença percentual da eficiência é o resultado da subtração das duas eficiências dividido pela maior eficiência, multiplicado por 100.

$$\text{Dif. n.(\%)} = \frac{n1-n2}{n1} * 100 \quad (5)$$

Em que:

Dif. n.(%) = diferença em (%) de eficiência;

n1 = Eficiência Temperatura 1 (%);

n2 = Eficiência Temperatura 2 (%);

Diferença % da potência:

A diferença percentual da potência é o resultado da subtração das duas potências dividido pela maior eficiência, multiplicado por 100.

$$\text{Dif P (\%)} = \frac{P1-P2}{P2} * 100 \quad (6)$$

Em que:

Dif P (%) = Diferença em (%) da potência;

P = Potência gerada Temperatura 1 (%);

P = Potência gerada Temperatura 2 (%);

2.4 MÉTODOS DE ANÁLISE DOS DADOS

ABDOLZADEH & AMERI, 2009 Analisou o comportamento do efeito do resfriamento ao longo de todo tempo, sem destacar os momentos de Baixa ou Alta irradiação. Com o intuito de verificar se o resfriamento produz efeito significativo sobre as variáveis monitoradas para os dois níveis de irradiação solar alto e baixo, montou-se um delineamento experimental inteiramente causalizados (DIC) de 4 tratamentos e 8 repetições, neste tipo de distribuição os tratamentos são distribuídos totalmente ao acaso em todas as unidades experimentais, utiliza-se repetições, e as condições experimentais da ocorrência dos diferentes tratamentos são uniformes (BANZATO & KRONKA, 2006).

Assim primeiramente estabeleceram-se quais seriam os tratamentos:

Alto_Quente – Nível de irradiação Alta – Temperatura Quente.

Alto_Frio – Nível de irradiação Alta – Temperatura Fria.

Baixa_Quente – Nível de irradiação Baixa – Temperatura Quente.

Baixo_Frio – Nível de irradiação Baixa – Temperatura Fria.

O nível de irradiação Alta foi definido como os momentos que ocorreram irradiações próximas ou estatisticamente iguais ao redor de uma média de 1000 W/m^2 , estabeleceu-se este nível, pois é neste que há maior produção de energia elétrica fotovoltaica (Colienne Demain et. Al, 2013). O nível de irradiação Baixa, foi definido como os momentos que ocorreram irradiações iguais ao redor de uma média de 700 W/m^2 , pois é um dos níveis de irradiação mais baixo de grande ocorrência no Brasil (Siqueira, 2004). Já o nível de temperatura Quente, foi definido como os momentos de máxima temperatura ocorrida dentro dos de cada nível de irradiação estabelecido, e o nível de temperatura Frio foi definido dentro dos níveis de irradiação os momentos que ocorreram o resfriamento.

Tendo em vista que os dois principais fatores que afetam a produção de energia em painéis fotovoltaicos são os níveis de irradiação e a temperatura do painel (CRESESB, 2014), buscou-se selecionar valores de irradiação dentro destes níveis estabelecidos o mais próximo da média possível para atender a condição de homogeneidade exigida para efetuar um delineamento inteiramente casualizado (DIC) não necessitando ser organizado em forma de blocos (DBC), pois as condições são uniformes para todos os tratamentos. Para comprovar que as condições dos tratamentos delimitados são uniformes, aplicou-se a ANOVA e os testes de Tukey e Fisher para os valores de irradiação solar global incidente, para todos os tratamentos, visando comprovar e atender esta premissa.

Para compor as repetições dos diferentes tratamentos, destacou-se objetivamente 8 momentos de 5 minutos para cada tratamento. Observando as condições que atendessem a classificação que delimita os tratamentos, dentro de todos os dados coletados nos três períodos organizados de forma crescente ao nível de irradiação. Inicialmente só seria efetuado o período de coletas 1, mas como não produziu o número suficiente de repetições para compor os diferentes tratamentos adicionou-se os períodos de coleta 2 e 3 visando facilitar a interceptação dos níveis de irradiação estabelecidos, estes abriram espaço para novos tipos de análises, para verificar o comportamento dos dados. Manteve-se o período de coleta 1 para

verificar o efeito do resfriamento intermitente, resultando em mais uma forma de verificar o efeito do resfriamento sobre as variáveis monitoradas.

Para testar se há diferença estatística significativa produzida pelos diferentes tratamentos sobre as variáveis analisadas que são: Irradiação (kW/m^2); T. painel ($^{\circ}\text{C}$); Corrente (A); Tensão (V); Potência (W) e eficiência (n%), primeiramente se aplicou a ANOVA pretendendo verificar a ocorrência de diferença significativa entre os tratamentos. posteriormente caso ocorra esse interação entre as variáveis, foi aplicado o teste de Tukey (MUCELIN, 2006) para verificar a classificação destas e diferenças em grupos de médias estatisticamente iguais ou diferentes a 5% de significância (BORGES, 2003).

Foram testadas as seguintes hipóteses:

H1 - O resfriamento produz efeito significativo sobre as variáveis monitoradas para os dois níveis de irradiação.

Vs.

H0 - O resfriamento não produz efeito significativo sobre as variáveis monitoradas para os dois níveis de irradiação.

Dentro das análises incluído também a plotagem de gráficos de interação entre os níveis de irradiação crescente e as variáveis monitoradas, para os períodos 2 e 3 separadamente dentro do mesmo gráfico para comparar os resultados encontrados, com o intuito de melhor visualizar as diferenças e o comportamento das variáveis ao longo dos períodos.

Para verificar as diferenças quantitativas produzidas pelos tratamentos sobre as variáveis analisadas: T. painel ($^{\circ}\text{C}$); Corrente (A); Tensão (V); Potência (W) e eficiência (n%), utilizou-se também uma tabela contendo o resumo dos valores médios para cada tratamento, e das diferenças entre os mesmos.

2.4.1 Coeficiente de correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson é um indicador adimensional que mede o grau de relação linear e a direção entre duas variáveis quantitativas, neste trabalho, este coeficiente foi usado para verificar a interação nas análises de vários parâmetros e para calcular o seu valor é utilizado a Equação 7 (DANCEY & REIDY, 2006).

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (7)$$

Na interpretação para classificação de seu módulo, o valor calculado pode variar de -1 a 1, o sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento, e o valor sugere a força da relação entre as duas variáveis. Uma correlação perfeita (-1 ou 1) indica que o valor de uma variável pode ser determinada exatamente ao saber o valor da outra, da mesma forma que o valor 0 indica que não há relação alguma entre as duas variáveis, na prática valores extremos (0 ou 1) dificilmente são encontrados. Na interpretação da magnitude do coeficiente segundo (DANCEY & REIDY, 2006), um valor de $r=0,1$ até $0,3$ (fraco); de $0,4$ até $0,6$ (moderado); $r=0,7$ até 1 (forte), assim quanto mais próximo de 1 mais forte é a dependência estatística entre as duas variáveis.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 IMAGENS TÉRMICAS

O efeito do resfriamento sobre a temperatura superficial do conjunto de painéis pode ser visto nas Figuras 29 e 30, que são as imagens térmicas do conjunto de painéis antes e depois de uma das etapas de resfriamento.

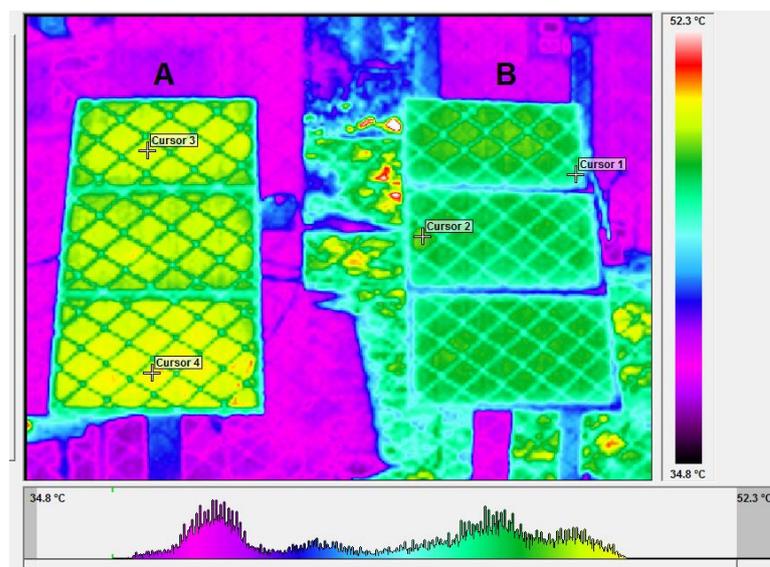


Figura 29. Imagem térmica dos painéis antes o resfriamento.

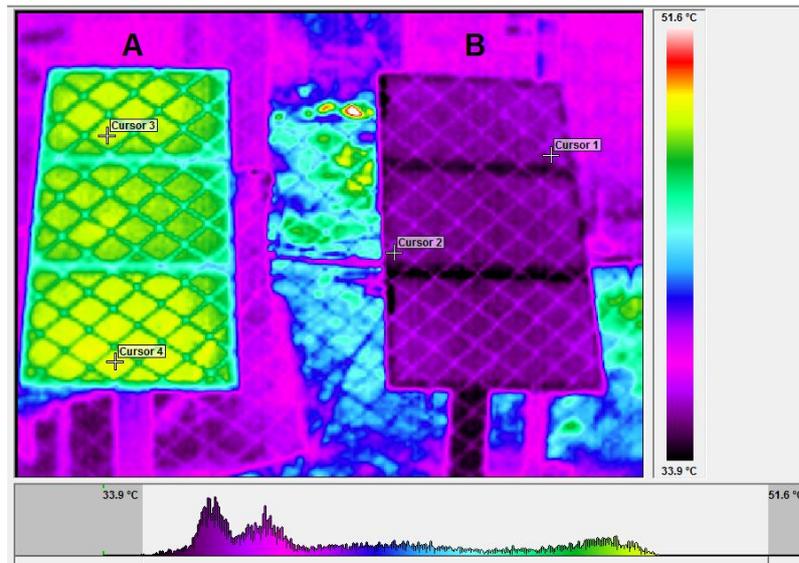


Figura 30. Imagem térmica dos painéis após o resfriamento.

Tabela 9. Evolução da temperatura superficial do painel com o resfriamento.

	Antes do resfriamento	Após o resfriamento	Diferença (°C)
Cursor 1	44,9°C	35,5°C	9,4°C
Cursor 2	47,4°C	36,2°C	11,2°C
Cursor 3	48,9°C	48,3°C	0,6°C
Cursor 4	49,5°C	49°C	0,5°C

O painel A é o painel que não passou por nenhum tipo de resfriamento, e o painel B é o painel que foi resfriado. Observa-se comparando a Figura 29 com a Figura 30 com os dados de temperaturas dos cursores na Tabela 9, que a temperatura do painel passou de antes do resfriamento, de 44,9°C para 35,5°C, gerando uma redução de aproximadamente de 9,4°C na temperatura superficial do painel proporcionado pelo sistema de aspersão inferior. Após um período de acionamento de 20 minutos observa-se que há uma boa uniformidade da temperatura do painel oscilando entre os cursores 1 e 2 de 35,5°C (mais Frio), para 36,2°C (mais Quente) e após o resfriamento, uma diferença de 0,7°C, de acordo com as medições da câmera térmica.

O painel em que estão posicionados os cursores 3 e 4 não passou por nenhum processo de resfriamento, observa-se que os valores de temperatura alcançaram valores de 48,3°C até 49°C, já o painel que está posicionado os cursores 1 e 2, já havia passado por um processo de resfriamento neste dia, fazendo com que a temperatura inicial Quente seja menor quando comparado ao painel que não havia passado por nenhum resfriamento.

3.2 RESULTADO DOS TRATAMENTOS.

Tabela 10 .Resumo da classificação estatística dos resultados para os tratamentos.

Fator	Irradiação (kW/m ²)	T.Pain. (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Eficiência (%)
Alta_Quente	1,01 A	27,9 A	15,3 C	3,8 A	59,3 B	8,5 BC
Alta_Frio	1,02 A	16,7 B	16,7 A	4,0 A	67,5 A	9,7 A
Baixa_Quente	0,70 B	27,0 A	16,1 B	2,4 B	38,4 C	8,0 C
Baixa_Frio	0,69 B	17,9 B	16,7 A	2,5 B	42,0 C	8,8 B

Médias seguidas por letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey $p > 0,05$.

Como para o teste da ANOVA todos os tratamentos apresentaram diferença significativa, só se apresentam na Tabela 10 os resultados da classificação de grupos com médias estatisticamente iguais de Tukey. As análises completas se encontram no anexo A. Analisando os dados de Irradiação se verifica que dentro do mesmo grupo de irradiação variando a temperatura, não há diferença estatística entre os tratamentos. E entre os grupos de irradiação houve diferença significativa. Assim os efeitos observados dentro do mesmo grupo de irradiação são fruto da variação da temperatura do painel proporcionada pelo sistema de resfriamento.

Para Temperatura os tratamentos Baixa_Quente e Alta_Quente, foram considerados estatisticamente iguais e maiores que os tratamentos Baixo_Frio e Alto_Frio. O menor nível de temperatura foi observado quando o painel esteve em Alto_Frio com 16,7°C, a causa disto é que com uma maior irradiação a evaporação da água aspergida sobre os painéis evapora mais do que em relação a um nível de irradiação Baixo, conseqüentemente há um maior resfriamento do painel.

Comparando a Tensão de saída dos painéis para o tratamento Baixo_Quente e Baixo_Frio, observa-se que as tensões médias ficaram em 16,1V e 16,7V respectivamente. E para os tratamentos Alto_Quente e Alto_Frio em 15,6V e 16,7V. Ou seja para Tensão, observa-se que dentro do mesmo nível de irradiação reduzindo a temperatura do painel, há um acréscimo da tensão proporcionada pela redução da resistência interna que diminui a queda de tensão. O menor nível de Tensão foi verificado no tratamento Alto_Quente, neste nível de tensão há mais corrente que acaba por potencializar a queda de Tensão.

Avaliando os resultados para a Corrente, constata-se que para os tratamentos Alta_Quente e Alta_Frio a mesma foi considerada como estatisticamente igual, mesmo

resultado encontrado para Baixa_Quente e Baixa_Frio. Resultado esperado, pois a variação da Corrente de saída de um painel tem uma relação linear com a Irradiação incidente (CRESESB, 2014). Observa-se também que dentro de mesmo nível de irradiação Baixa ou Alta ao reduzir a temperatura de Quente para Frio, ocorreu um pequeno aumento da Corrente, que não produziu diferença estatística a 5% de significância.

Como esperado ao ter aumento da Tensão e da Corrente ao o painel ter sido resfriado, haverá o aumento da Potência para os dois níveis de irradiação. Como a Corrente varia linearmente com a Irradiação, o maior nível de Potência foi encontrado no tratamento Alta_Frio com 67,5 W, e o menor no tratamento Baixo_Quente com 38,4 W. A Eficiência seguiu o mesmo comportamento observado na Potência.

Tabela 11. Valores médios e diferenças absolutas e percentuais entre os tratamentos Alta e Baixa irradiação.

Nível Alto de Irradiação						
	I. Solar kW/m ²	T. Painel (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	p (W)	n (%)
\bar{x} Frio	1,020	16,72	16,73	4,04	67,55	9,73
Dev.pad.	±0,016	±0,94	±0,28	±0,21	±3,60	±0,40
\bar{x} Quente	1,019	27,95	15,36	3,86	59,27	8,55
Dev.pad.	±0,017	±1,45	±0,32	±0,10	±2,07	±0,27
Dif	0,001	11,23	1,37	0,18	8,28	1,18
Dif(%)	0,009%	40,19	8,18	4,46	12,26	12,17
Nível Baixo de Irradiação						
	I. Solar kW/m ²	T. Painel (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	p (W)	n (%)
\bar{x} Frio	0,699	18,00	16,74	2,51	41,98	8,83
Dev.pad.	±0,018	±0,99	±0,57	±0,14	±2,67	±0,41
\bar{x} Quente	0,703	27,00	16,12	2,38	38,42	8,02
Dev.pad.	±0,021	±0,91	±0,40	±0,18	±2,60	±0,42
Dif	0,004	9,01	0,62	0,12	3,56	0,80
Dif(%)	0,5%	33,35	3,68	4,93	8,48	9,09

Analisando as diferenças produzidas pelo resfriamento nos dois níveis de irradiação mostradas na Tabela 11, observa-se que para todas as variáveis avaliadas ocorreu aumento com o resfriamento, sendo que os aumentos foram maiores para o nível de irradiação mais alto (exceto para corrente).

A diferença da Temperatura do painel para um nível de irradiação mais alto ficou em 11,23°C maior quando se comparado com a diferença produzida pelo sistema de resfriamento

em um nível de irradiação Baixo onde que ficou em 9°C. A tensão em um nível de irradiação Alto teve um incremento de 8,18% e para um nível baixo 3,68%. Este resultado corrobora com o encontrado por ABDOLZADEH & AMERI, 2009 onde em um painel Policristalino a tensão passou de 14,37 a 16,06 V quando resfriado, produzindo uma diferença de 10,5% com uma redução de temperatura de 11°C. S. Nižetić, et al., 2015 observou um aumento da tensão de 15,5 V a 56°C, para 17,6 V a 33,7°C produzido pelo resfriamento na superfície inferior do painel de cristal Policristalino, gerando um aumento de 11,9% com o resfriamento.

O aumento relativo da Corrente foi maior para um nível de Irradiação Baixo, onde neste nível foi 4,93% e para o nível alto ficou em 4,46%. ABDOLZADEH & AMERI, 2009 também encontrou um aumento da corrente de saída de painéis fotovoltaicos quando resfriado em condições de geração de campo em painéis Policristalinos. Onde ao reduzir 11°C, a corrente passou de 6,52 A para 6,36 A. Masoud et al., 2005 observou que ao a temperatura cair de 42,4°C para 33,9°C a corrente do painel Policristalino em condições de campo, passou de 2,92 A para 3,33 A.

A Potência também teve um maior aumento em um nível de irradiação Alto, passando de 59,27 W para 67,55 W quando Frio. Enquanto que em um nível de irradiação Baixo passou de 38,42 W para 42 W quando Frio. O aumento relativo da potência para um nível alto foi de 12,26% com uma redução de 11,23°C na temperatura, e de 8,48% com uma redução de 9°C para um nível baixo. S. Nižetić, et al., 2015 observou que ao reduzir a temperatura de 56°C para 33°C houve um aumento relativo de 14% na potência de um painel Policristalino. SANTOS & MICHELS, 2011 observaram que com uma redução de 40°C para 25°C na temperatura do painel Policristalino, houve um incremento de 5,55% na potência de saída do painel.

Os níveis de eficiência média variaram de 8,02 % a 9,73 %, ficando próximo do especificado pelo fabricante que é de 9,5% para as condições de ensaio padrão de teste, e dentro da mesma faixa encontrado por GNOATTO et. al., 2008 que obteve em condições de campo 8,65 % a 9,17 % em um painel Policristalino. A eficiência teve um aumento relativo de 12,17% em um nível de irradiação alto e 9,09% em nível de irradiação Baixo, com aumentos absolutos de 1,18 % e 0,8 % respectivamente. ABDOLZADEH & AMERI, 2009 com uma redução de 11°C obtiveram um aumento de 1,35 % absoluto na eficiência do painel Policristalino. ILHAN CEYLAN, et al., 2013 observaram um aumento absoluto de 3% na eficiência ao resfriar de 55°C para 45°C. (K.A. Moharram, et al., 2013) obtiveram um

aumento relativo de 12,5% na eficiência com uma redução de 10°C na temperatura do painel do tipo Policristalino.

3.3 INTERAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS ANALISADAS E OS NÍVEIS CRESCENTES DE IRRADIAÇÃO.

Com os dados de coletados dos períodos 2 e 3, que são os períodos com e sem resfriamento e com resfriamento, se correlacionou os valores das variáveis monitoradas com os níveis crescentes de irradiação solar global, a fim de verificar que tipo de interação ocorre entre estas variáveis, e que possíveis diferenças podem ser observadas .

Na Figura 31 é possível observar que a relação entre irradiação e corrente é linear, como esperado de acordo com (CRESESB, 2014), (TUKA et al, 2011) e (Masoud et al,2005). Observa-se também que os níveis de corrente em um painel resfriado são levemente maiores principalmente a partir de 0,8 kW/m², o coeficiente angular da reta para o painel resfriado também é discretamente maior com um valor de 3,81 comparado com o painel sem resfriamento com um valor de 3,63, como os coeficientes de posição são muito próximos pode-se verificar uma tendência de que os valores de corrente para um painel resfriado sejam maiores.

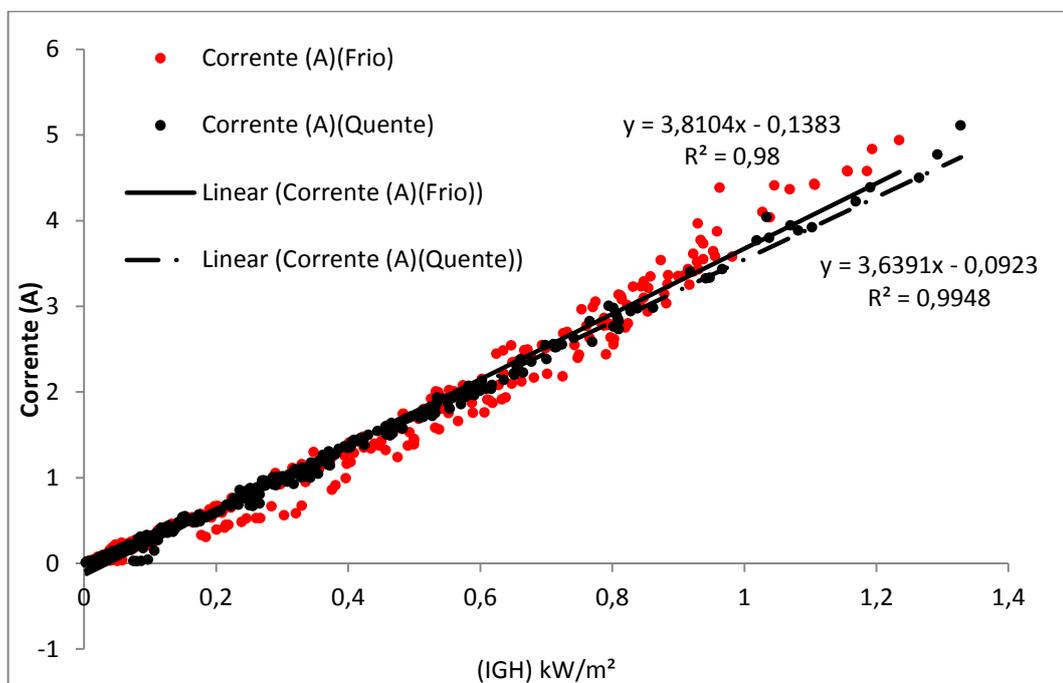


Figura 31. Interação (1) entre corrente e irradiação solar global incidente no plano.

Para tensão observa-se pela Figura 32. Interação (2) que a relação entre a irradiação incidente e a tensão de saída do conjunto de painéis é logarítmica como esperado de acordo

com (CRESESB, 2014), (TUKA et al, 2011) e (Masoud et al,2005), onde que aproximadamente a partir de 0,4 kW/m² os níveis de tensão se estabilizam tanto para o painel com resfriamento como para o painel sem resfriamento. Observa-se também que a partir de 0,6 kW/m², os níveis de tensão do painel com resfriamento são claramente maiores quando se comparados com os níveis de tensão do painel sem resfriamento.

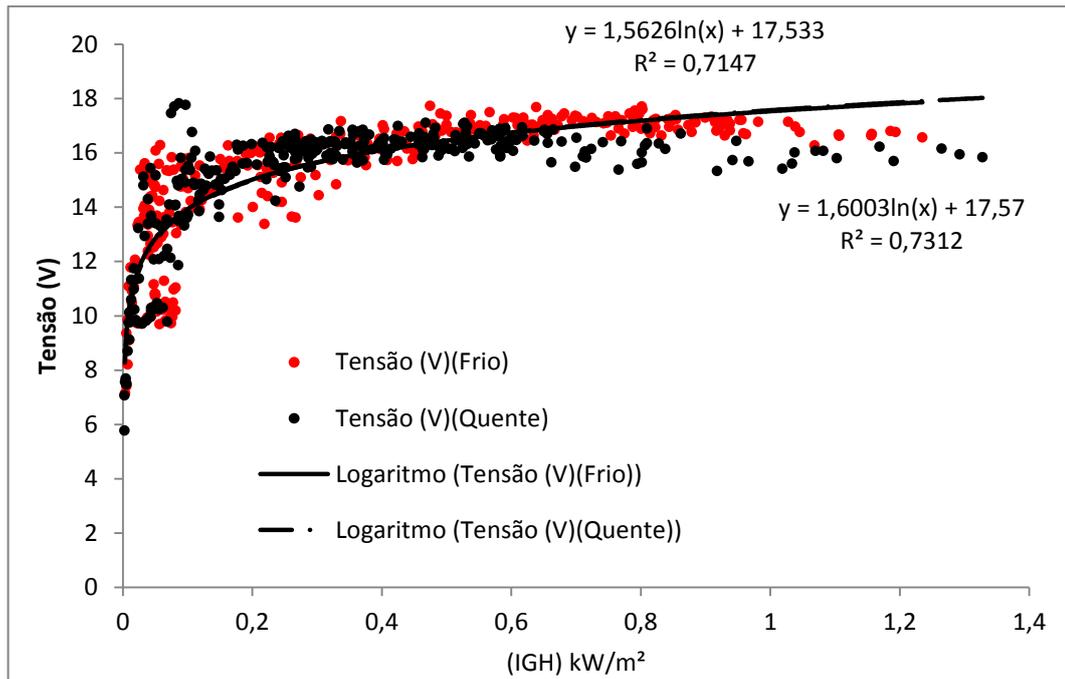


Figura 32. Interação (2) entre tensão e irradiação solar global incidente no plano.

A potência varia linearmente com o aumento da irradiação solar incidente sobre o plano do conjunto de painéis como observado na Figura 33. Interação (3), como esperado de acordo com (CRESESB, 2014), (TUKA et al, 2011) e (Masoud et al,2005). Observasse que os níveis de potência para o painel Frio apresentam valores maiores a partir de 0,6 kW/m², além disto pelo coeficiente angular da reta é possível verificar uma maior tendência de que o painel com resfriamento apresente valores maiores quando se comparado com os valores encontrados para o painel com resfriamento, onde o coeficiente ficou em 65,49 para o painel com resfriamento, e 59,13 para o painel sem resfriamento, o coeficiente de posição ficou menor para o painel Quente, pois os valores de potência do painel Frio passaram a ser maiores a partir de 0,6 kW/m² de irradiação.

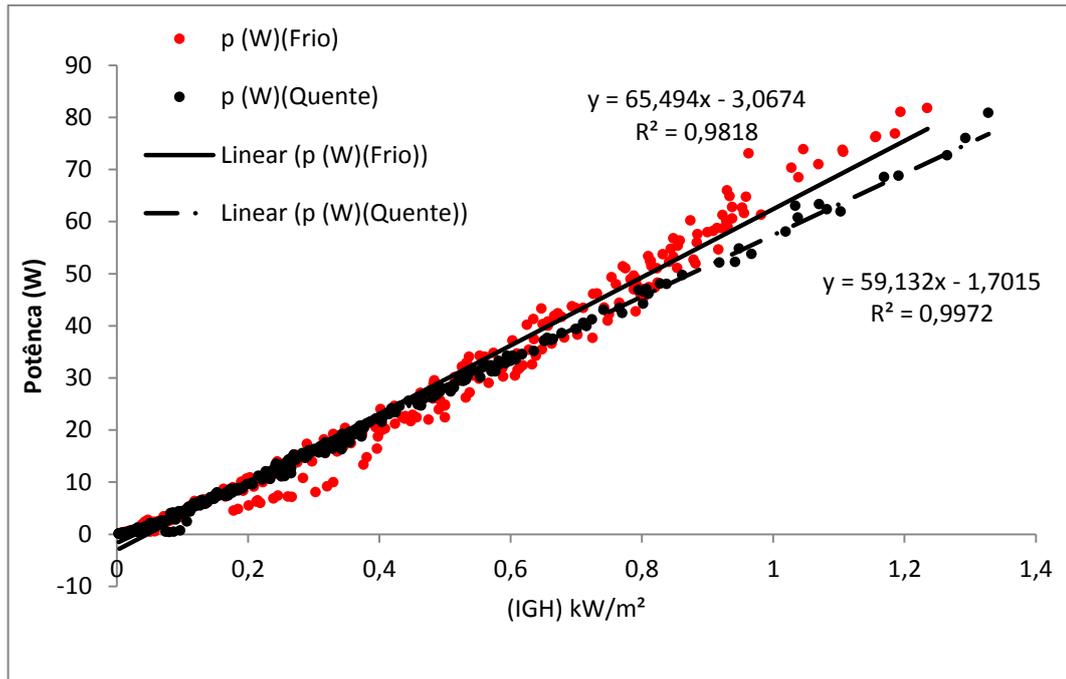


Figura 33. Interação (3) entre potência e irradiação solar global incidente no plano.

Avaliando as variações crescentes de irradiação sobre a variação da eficiência do painel visualizando na Figura 34. Interação (4), observa-se que há uma interação logarítmica entre as duas variáveis, como esperado de acordo com (CRESESB, 2014), (TUKA et al, 2011) e (Masoud et al,2005). Os valores de eficiência de um painel resfriados a partir de 0,6 kW/m², possuem uma tendência de apresentar valores maiores. Pelo coeficiente angular dos modelos podemos verificar que há uma tendência de os valores de um painel resfriado apresentar valores maiores de eficiência, onde o coeficiente angular para o painel Quente ficou em 1,36, e 1,51 para o painel resfriado.

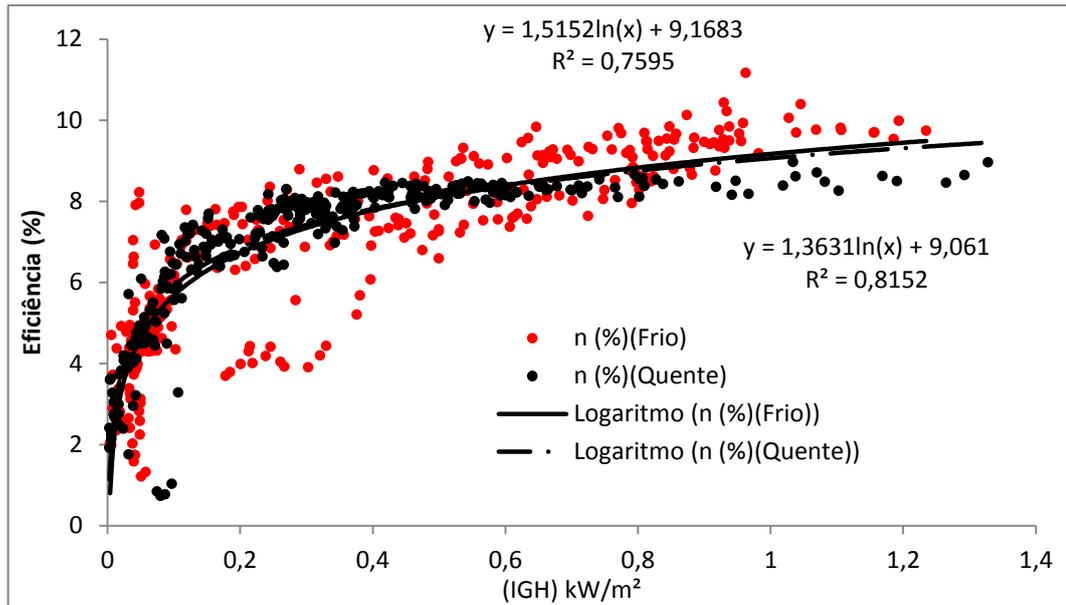


Figura 34. Interação (4) entre eficiência e irradiação solar global incidente no plano.

Na Figura 35. Interação (5) é visualizado o claro efeito de que com o aumento da irradiação solar incidente sobre um painel resfriado há a diminuição de sua temperatura, que está de acordo com o resultado obtido por (H. Bahaidarah, 2013). A interação foi classificada como forte, pois o valor de $r = 0,74$, e uma relação inversa, pois o coeficiente angular da reta tem valor negativo de $-7,81$, o mesmo fato não é observado quando o painel esteve Quente.

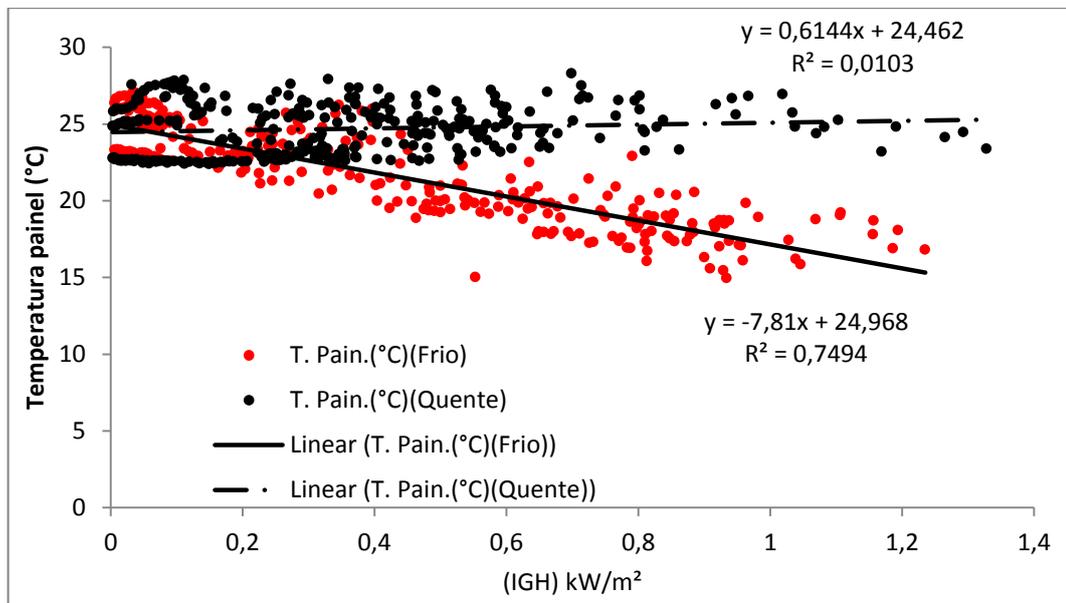


Figura 35. Interação (5) entre a temperatura do painel e irradiação solar global incidente no plano.

4 CONCLUSÃO

A irradiação que incidiu sobre os painéis é estatisticamente diferente entre os dois grupos de irradiação Alta e Baixa, e dentro do mesmo grupo de irradiação variando a temperatura é estatisticamente igual. Assim as variações produzidas dentro do mesmo grupo de irradiação são resultado da variação das temperaturas provocada pelo tratamento resfriamento.

A temperatura do painel quando resfriado teve uma relação inversa com o aumento da irradiação, assim com o aumento da irradiação ocorreu à redução da temperatura do painel, este fato é devido em que em maior irradiação há uma maior evaporação assim fazendo com que acelere o processo de resfriamento do painel.

O resfriamento proporcionou ganhos nos níveis de Tensão (V), Corrente (A), Potência (W) e eficiência (%).

O objetivo de avaliar o efeito do resfriamento com água sobre o desempenho energético de um conjunto de painéis fotovoltaicos, conectado a rede interna de uma residência, foi alcançado. A hipótese de que a redução da temperatura com o resfriamento proporciona incremento nas variáveis monitoradas para os dois níveis de irradiação, para as condições do dado experimento foi aprovado, assim o resfriamento proporcionou aumento significativo da eficiência do painel em uma análise final.

Isto mostra que o sistema de resfriamento foi capaz de potencializar a geração de energia elétrica de painéis fotovoltaicos, que pode ser utilizado para incrementar a energia gerada tanto em sistemas isolados para energização rural, como em sistemas conectado a rede urbanos e de usinas fotovoltaicas.

Sugestão para trabalhos futuros:

-Investigar a viabilidade econômica de se fazer o resfriamento de painéis fotovoltaicos por meio de aspersão de água.

-Investigar o potencial técnico-econômico do uso de painéis híbridos PV-T (Fotovoltaico – Térmico), com este tipo de painel é possível obter água quente e energia elétrica com incremento de eficiência proporcionado pelo sistema de resfriamento à água em um único painel.

-Avaliar a qualidade da energia elétrica enviada para rede pelo inversor *Grid-Tie*.

5 REFERÊNCIAS

Aramizu.J. Modelagem e Análise de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico em Operação Isolada e em Paralelo com uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica. Trabalho de conclusão de curso. Universidade de São Paulo (USP). São Carlos-SP. 2010.

Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL. (2013, ago.). [Online]. Resolução Normativa nº482, de 17 de abril de 2012. Disponível: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf/>.

ABDOLZADEH, M; AMERI, M. Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells. *Renewable Energy*, v.34, p. 91-96, 2009.

BANZATO, D.A.; KRONKA, S.N. Experimentação agrícola. 4.ed. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 237p.

BECKER, H. Reduced output of generation due to pollution. Barcelona: EUPU, 1997

Borges LC & Ferreira DF (2003) Poder e taxas de erro tipo I dos testes Scott-Knott, Tukey e Student-Newman-Keuls sob distribuições normais e não normais dos resíduos. *Revista de Matemática e Estatística*, 21:67-83.

Campbellscientific CR1000. Instruction manual CR1000 Measurement and Control System, disponível em: <http://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cr1000.pdf>.

Campbellscientific Cmp3-L . Instruction manual, Cmp3-L, Pyranometer. Disponível em : <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cmp3.pdf>.

CRESESB/CEPEL. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito; Grupo de trabalho de Energia Solar. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: 2014. 530p.

CENTRO de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito: CRESESB. Disponível em: <www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 10 março. 2008.

CAMUS, C.; EUSÉBIO, E. *Gestão de energia: energia solar*. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação. 2006.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA A ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO - CRESESB. 2000. Disponível em: www.cresesb.cepel.br/cresesb.htm.

DANCEY, Christine & REIDY, John. (2006), *Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows*. Porto Alegre, Artmed.

DIENSTMANN.G. Energia solar uma comparação de Tecnologias. Trabalho de Diplomação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).Porto Alegre.2009.

EPE. 2014, Anuário estatístico de energia elétrica 2014. Acesso em 23/03/2015. Disponível em

<<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202014.pdf>>

ELETROBRAS. Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005: classe Residencial Relatório Brasil - Sumário Executivo. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2009. 187 p. (Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil).

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Rio de Janeiro: EPE, 2012.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil –Condicionantes e Impactos. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

EHRlich D., Stirling engines meet solar power in the desert, Cleantech Group, Abr. 2008. Desertec Website: www.desertec.org. Acesso: Mar. 2015.

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION [EPIA]. *Global Market Outlook for Photovoltaics 2014 – 2018*. EPIA, 2014.

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION [EPIA]. *Sustainability Of Photovoltaic Systems. Job Creation*. EPIA Fact Sheet, 24th September 2012.

European Wind Energy Association – EWEA. Disponível em: <<http://www.ewea.org/>>
GOLDENBERG, José; MOREIRA, José Roberto. Política energética no Brasil. Estudos Avançados, vol. 19 no 55, 2005

GUSMÃO, M. V. et al. O programa de eletrificação rural “luz no campo”. Programa de pesquisas em eletrificação rural e fontes de energias renováveis – CEPEL – PER, 2002. Disponível em < [HTTP://www.cepel.br/~per/download/rer/ivagrener02.pdf](http://www.cepel.br/~per/download/rer/ivagrener02.pdf). > Acesso em: 15.Fev.2015.

GNOATTO, E. Desempenho de painel fotovoltaico para geração de energia elétrica na região de Cascavel. 2003. 50 f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Sistemas Agroindustriais) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR, 2003.

GXASHEKA, A. R.; VAN DYK, E. E.; MEYER, E. L. Evaluation of performance parameters o PV modules deployed outdoors. *Renewable Energy*. Amsterdam, Netherlands, n.30, p.614, 2005.

GNOATTO, E.; DALLACORT, R.; RICIERI, R. P.; SILVA, S. L.; FERRUZI, Y. Eficiência de um conjunto fotovoltaico em condições reais de trabalho na região de Cascavel. *Acta Scientiarum Technology*, Maringá, v. 30, n.2, p. 215-219, 2008.

H. Bahaidarah, Abdul Subhan, P. Gandhidasan, S. Rehman, Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions, *Energy*, Volume 59, 15 September 2013, Pages 445-453, ISSN 0360-5442, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.050>.

IEA [International Energy Agency]. Technology Roadmap - Concentrating Solar Power. Paris (França): IEA, 2010c. Disponível em: <http://www.iea.org/papers/2010/csp_roadmap.pdf>. Acesso em: outubro de 2014

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). *Key World Energy Statistics 2014*. IEA.

Paris - França, 2014a.

Solar Energy Perspectives. International Energy Agency (2011a) (http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/solar_energy_perspectives2011.pdf)

Siqueira, Adalberto nunes de. Estudo das Distribuições de Probabilidade da Radiação Solar Diária no Brasil. Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear. Recife, Pernambuco, Brasil.2004.

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). *Solar Energy Perspectives 2011*. IEA.

Paris França, 2011b

İlhan Ceylan, Ali Etem Gürel, Hüsamettin Demircan, Bahri Aksu, Cooling of a photovoltaic module with temperature controlled solar collector, *Energy and Buildings*, Volume 72, April 2014, Pages 96-101, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.058>.

K.A. Moharram, M.S. Abd-Elhady, H.A. Kandil, H. El-Sherif, Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 4, Issue 4, December 2013, Pages 869-877, ISSN 2090-4479, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2013.03.005>.

Masoud Farhoodnea, Azah Mohamed, Tamer Khatib, Wilfried Elmenreich, Performance evaluation and characterization of a 3-kWp grid-connected photovoltaic system based on tropical field experimental results: new results and comparative study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 42, February 2015, Pages 1047-1054, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.090>.

Masspower. Especificações técnicas Solar Power Grid-Tie Inverter, modelo SUN-600G, disponível em: <http://chinesegrid.com/en/info.aspx?Id=83>

M. Abdolzadeh, M. Ameri, Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells, *Renewable Energy*, Volume 34, Issue 1, January 2009, Pages 91-96, ISSN 0960-1481, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.03.024>.

MICHELS, Roger N. Avaliação do bombeamento de água em um sistema alimentado por painéis fotovoltaicos. *scielo*,2009. Disponível em< http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-69162009000300004&script=sci_arttext> acessado no dia 20 de abril 2012.

MICHELS, R. N. et al. Avaliação do bombeamento de água em um sistema alimentado por painéis fotovoltaicos. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.29, n.3, p.370-379, jul./set. 2009.

MUCELIN, Carlos A. Estatística elementar e experimental aplicada às tecnologias. 2.ed. Medianeira: Valério, 2006.

NTC [Normas Técnicas Copel], NTC 905200 – ACESSO DE MICRO E MINIGERAÇÃO AO SISTEMA DA COPEL. COPEL – Companhia Paranaense de Energia Elétrica. Curitiba – PR.2014.

PALZ, P. C., Energia solar e fontes alternativas. Hemus: São Paulo/SP.1995.

PROSTAR SOLAR COTROLERS. Manual do operador, PS-30 disponível

em <

http://www.morningstarcorp.com/en/support/library/PS2.IOM.Operators_Manual.01.EN1.pdf

> acesso em: 25 de março 2012.

S. Nižetić, D. Čoko, A. Yadav, F. Grubišić-Čabo, Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response, Energy Conversion and Management, Volume 108, 15 January 2016, Pages 287-296, ISSN 0196-8904,

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.079>.

Solenerg Engenharia e Comércio Ltda. Sistema de iluminação pública solar. Disponível em www.solenerg.com.br . acesso em: 15 out. 2014.

Silva R. J. et al. Geração de Energia Elétrica Sustentável, Utilizando Placas Solares em Residências, Objetivando a Economia de Energia. 2015.

SILVA, Luciano Fernandes; CARVALHO, Luiz Marcelo de. A Temática Ambiental e o Ensino de Física na Escola Média: Algumas Possibilidades de Desenvolver o Tema Produção de Energia Elétrica em Larga Escala em uma Situação de Ensino. Rev. Bras. Ensino Fís., São Paulo , v. 24, n. 3, p. 342-352, Sept. 2002 . <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-47442002000300012>.

SANTOS, J. A. A; MICHELS, R. N. Influência de fatores ambientais sobre o desempenho de um sistema de bombeamento fotovoltaico: um estudo de caso. Revista Agroambiental, Pouso Alegre, v. 03, n. 3, p. 51-55, 2011.

SOUZA, Adilson Pacheco de et al . Estimativa da radiação global incidente em superfícies inclinadas por modelos isotrópicos e índice de claridade. Pesq. agropec. bras., Brasília , v. 45, n. 4, p. 339-350, Apr. 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010000400001>.

TOLMASQUIM, M. T. Fontes renováveis de energia no Brasil. Rio de Janeiro: Interciência, Cinergia, 2003.

Tuka Al Hanai, Rehab Bani Hashim, Lana El Chaar, Lisa Ann Lamont, Environmental effects on a grid connected 900 W photovoltaic thin-film amorphous silicon system, Renewable Energy, Volume 36, Issue 10, October 2011, Pages 2615-2622, ISSN 0960-1481, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.010>.

TRIGUEIRO, André. A espetacular virada energética da Alemanha. 2013. Disponível em:< <http://www.mundosustentavel.com.br/2013/09/a-espetacular-virada-energetica-da-alemanha/> >. Acesso em :11 maio 2015.

ANEXO A. RESULTADOS COMPLETOS DOS TESTES ESTATÍSTICOS.

Teste 1. Variável analisada: Irradiação solar kW/m².

Hipótese nula Todas as médias dos tratamentos são iguais

Hipótese alternativa Pelo menos um é diferente

Nível de significância $\alpha = 0,05$

Tabela 1. Teste 1. Variável analisada: kW/m²

Anova					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Fator	3	0,810998	0,270333	800,67	0,000
Erro	28	0,009454	0,000338		
Total	31	0,820451			
Medias					
Fator	N	Mean	StDev	95% CI	
Alta_Quente (IGH) kW/m ²	8	1,01950	0,01779	(1,00619; 1,03281)	
Alta_Frio (IGH) kW/m ²	8	1,02012	0,01608	(1,00682; 1,03343)	
Baixa_Quente (IGH) kW/m ²	8	0,70388	0,02111	(0,69057; 0,71718)	
Baixa_Frio (IGH) kW/m ²	8	0,69900	0,01816	(0,68569; 0,71231)	
Tukey					
Fator	N	Média	Grupo		
Alta_Frio (IGH) kW/m ²	8	1,02012	A		
Alta_Quente (IGH) kW/m ²	8	1,01950	A		
Baixa_Quente (IGH) kW/m ²	8	0,70388	B		
Baixa_Frio (IGH) kW/m ²	8	0,69900	B		

StDev = Desvio padrão

CI = Intervalo de confiança

Teste 2. Variável analisada: T. Painei (°C).

Tabela 2. Teste 2. Variável analisada: T. Painei (°C)

Anova					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Fator	3	829,35	276,450	225,14	0,000
Erro	28	34,38	1,228		
Total	31	863,73			
Médias					
Fator	N	Média	StDev	95% CI	
Alta_Quente T. Pain.(°C)	8	27,950	1,445	(27,147; 28,753)	
Alta_Frio T. Pain.(°C)	8	16,718	0,939	(15,915; 17,520)	
Baixa_Quente T. Pain.(°C)	8	27,004	0,908	(26,201; 27,806)	
Baixa_Frio T. Pain.(°C)	8	17,998	1,056	(17,195; 18,800)	
Tukey					
Fator	N	Média	Grupo		
Alta_Quente T. Pain.(°C)	8	27,950	A		
Baixa_Quente T. Pain.(°C)	8	27,004	A		
Baixa_Frio T. Pain.(°C)	8	17,998	B		
Alta_Frio T. Pain.(°C)	8	16,718	B		

Teste 3. Variável analisada: Tensão (V).

Tabela 3. Teste 3. Variável analisada: Tensão (V)

Anova						
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc	
Fator	3	10,160	3,3865	18,65	0,000	
Erro	28	5,085	0,1816			
Total	31	15,244				
Média						
Fator		N	Média	StDev	95% CI	
Alta_Quente Tensão (V)		8	15,364	0,323	(15,056; 15,673)	
Alta_Frio Tensão (V)		8	16,732	0,285	(16,424; 17,041)	
Baixa_Quente Tensão (V)		8	16,121	0,404	(15,812; 16,430)	
Baixa_Frio Tensão (V)		8	16,737	0,615	(16,428; 17,045)	
Tukey						
Fator		N	Média	Grupo		
Baixa_Frio Tensão (V)		8	16,737	A		
Alta_Frio Tensão (V)		8	16,732	A		
Baixa_Quente Tensão (V)		8	16,121	B		
Alta_Quente Tensão (V)		8	15,364	C		

Teste 4. Variável analisada: Corrente (A).

Tabela 4. Teste 4. Variável analisada: Corrente (A)

Anova						
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc	
Fator	3	18,2116	6,07052	223,15	0,000	
Erro	28	0,7617	0,02720			
Total	31	18,9733				
Média						
Fator		N	Média	StDev	95% CI	
Alta_Quente Corrente (A)		8	3,8576	0,0987	(3,7382; 3,9771)	
Alta_Frio Corrente (A)		8	4,0375	0,2077	(3,9181; 4,1569)	
Baixa_Quente Corrente (A)		8	2,3849	0,1790	(2,2654; 2,5043)	
Baixa_Frio Corrente (A)		8	2,5085	0,1546	(2,3891; 2,6279)	
Tukey						
Fator		N	Média	Grupo		
Alta_Frio Corrente (A)		8	4,0375	A		
Alta_Quente Corrente (A)		8	3,8576	A		
Baixa_Frio Corrente (A)		8	2,5085	B		
Baixa_Quente Corrente (A)		8	2,3849	B		

Teste 5. Variável analisada: Potência (W).

Tabela 5. Teste 5. Variável analisada: Potência (W)

Anova					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Fator	3	4637,0	1545,66	192,48	0,000
Erro	28	224,8	8,03		
Total	31	4861,8			

Médias					
Fator	N	Média	StDev	95% CI	
Alta_Quente potência (W)	8	59,273	2,073	(57,221; 61,325)	
Alta_Frio potência (W)	8	67,55	3,60	(65,50; 69,61)	
Baixa_Quente potência (W)	8	38,417	2,597	(36,365; 40,470)	
Baixa_Frio potência (W)	8	41,98	2,85	(39,92; 44,03)	

Tukey					
Fator	N	Média	Grupo		
Alta_Frio potência (W)	8	67,55	A		
Alta_Quente potência (W)	8	59,273	B		
Baixa_Frio potência (W)	8	41,98	C		
Baixa_Quente potência (W)	8	38,417	C		

Teste 6. Variável analisada: Eficiência (%).

Tabela 6. Teste 6. Variável analisada: Eficiência (%)

Anova					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Fator	3	12,310	4,1032	26,94	0,000
Erro	28	4,265	0,1523		
Total	31	16,574			

Médias					
Fator	N	Médias	StDev	95% CI	
Alta_Quente n (%)	8	8,5502	0,2707	(8,2676; 8,8329)	
Alta_Frio n (%)	8	9,735	0,403	(9,452; 10,017)	
Baixa_Quente n (%)	8	8,023	0,423	(7,741; 8,306)	
Baixa_Frio n (%)	8	8,825	0,441	(8,543; 9,108)	

Tukey					
Fator	N	Média	Grupo		
Alta_Frio n (%)	8	9,735	A		
Baixa_Frio n (%)	8	8,825	B		
Alta_Quente n (%)	8	8,5502	B C		
Baixa_Quente n (%)	8	8,023	C		