

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA RESOLUÇÃO TEMPORAL DE DADOS SOLARIMÉTRICOS NA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR

João Pedro Feitosa dos Santos Rocha, j.rocha@aln.senaicimatec.edu.br¹

Paulo Roberto Freitas Neves, paulo.neves@fieb.org.br¹

Alex Álisson Bandeira Santos, alex.santos@fieb.org.br¹

¹Centro Universitário SENAI CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador-BA, CEP: 41.650-010

Resumo: Demandas de calor em temperaturas de até 150 °C podem ser supridas por sistemas de aquecimento solar. Entretanto, tomadores de decisão em plantas industriais questionam o funcionamento desses sistemas, devido ao risco de que um sistema mal dimensionado possa causar paradas na operação da empresa. Desta forma, a precisão na estimativa de geração de energia térmica em sistemas de aquecimento solar para processos industriais (SHIP) é de extrema importância. Um relevante parâmetro para uma estimativa precisa é a qualidade dos dados de irradiação solar, normalmente utilizados em modelos de previsão com resolução temporal máxima de uma hora. O objetivo deste trabalho é avaliar o impacto da resolução temporal de dados solarimétricos na previsão do comportamento de sistemas de SHIP. Para o desenvolvimento do trabalho foi definido um perfil de consumo para uma indústria têxtil que apresenta uma demanda mensal de água quente com temperatura de processo de 60 °C, com uma vazão de consumo de 0,12 kg/s e demanda fixa de 24 horas por dia, 7 dias por semana e, composto por um sistema de aquecimento de água solar contemplando um sistema de aquecimento auxiliar e reservatório de armazenamento térmico. Dados de medição de irradiação e temperatura ambiente no período de um ano foram coletados da estação solarimétrica instalada no Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis (ISI-ER), localizado em Natal -RN e, o comportamento do sistema foi simulado e analisado sob diferentes resoluções temporais (entre 1 e 60 minutos). Para uma maior resolução temporal, os resultados apresentaram uma redução da energia térmica gerada pelo sistema de aquecimento solar e o aumento do consumo estimado para o sistema de aquecimento auxiliar. É possível concluir que uma maior resolução temporal (1 minuto) é relevante principalmente no dimensionamento mais preciso do sistema de aquecimento auxiliar (SAA) e do sistema de aquecimento solar (SAS).

Palavras-chave: Aquecimento solar. Energia térmica, SHIP, Resolução temporal

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de aquecimento solar térmico possuem um grande potencial de utilização ao redor do mundo. Os processos industriais de setores como alimentos e bebidas, têxtil, plásticos, papel e química, compartilham requisitos de energia térmica na faixa de temperaturas até 400 °C, que podem ser fornecidas com eficiência por coletores solares térmicos, conforme Tab. 1 (Sharma *et al.*, 2017).

Tabela 1. Processos industriais com faixa correspondente de temperaturas e calor de aquecimento e meio de transferência.

Indústria	Processo	Temperatura °C	Meio de transferência
Processamento de comida, processamento de leite e produção de bebidas	Cozimento	70 – 120	Vapor, Água
	Pasteurização	60 - 150	Vapor
	Esterilização	100 - 140	Vapor
	Têmpera	40 - 80	Vapor
	Secagem e desidratação	40 - 100	Ar
	Lavagem	40 - 80	Vapor, ar
	Tratamento térmico	60 – 80	Água
Têxtil	Empalidecer	60 – 90	Água
	Secagem, Desengorduramento	100 - 130	Vapor
	Passagem	120 – 140	Vapor
	Impressão	40 – 130	Água, Vapor
	Destilação	100 – 200	Água

Química e farmacêutica	Evaporação	110 – 170	Vapor
	Secagem	120 – 170	Ar, vapor
Automobilística	Tratamento pré-pintura	40- 50	Água
	Secagem da pintura	150 – 175	Ar
	Cozimento de tintas	175 - 225	Vapor

Ernst e Gooday, 2019, descobriram que a resolução temporal dos dados solarimétricos pode ter impacto significativo na distribuição da irradiância, devido a flutuações em curto espaço de tempo, causadas, por exemplo, pelo efeito de aprimoramento da nuvem. Eles perceberam que dados com resolução de até 10 minutos oferecem uma melhoria significativa em relação aos conjuntos de dados por hora.

Atividades no setor industrial de um país possuem um impacto significativo no crescimento econômico. Globalmente, uma grande quantidade de consumo de energia vem do setor industrial como pode ser visto na Tab. 2 (Sharma *et al.*, 2017). Nota-se que a média de consumo de energia por parte das indústrias globalmente está por volta de 35%.

Tabela 2. Percentual de utilização de energia por parte das indústrias em alguns países globalmente.

País	Percentual de consumo de energia (%)
Brasil	41%
China	70%
Alemanha	28%
Índia	47%
Malásia	48%
Suécia	38%
África do Sul	44%
Turquia	21%
Estados Unidos	33%
Média global	35%

Essa energia consumida pela indústria é dividida na forma de energia elétrica e térmica. Energia elétrica é utilizada para iluminação, refrigeração, condicionamento do ar e para operação de motores elétricos enquanto a energia térmica é utilizada em aplicações como: secagem, tingimento, branqueamento (Sharma *et al.*, 2017).

Diante do exposto, a demanda de aquecimento de processo pode ser suprida por sistemas de aquecimento solar de temperaturas baixa (abaixo de 150 °C) e média (entre 150 a 400 °C) (Hahn *et al.*, 2018). Desta forma, é de enorme importância uma modelagem precisa de sistemas térmicos (Sistema de Aquecimento Solar - SAS, Sistema de Aquecimento Auxiliar – SAA e, Armazenamento - ARM) para atendimento da demanda de energia térmica de um processo industrial.

Um parâmetro crucial para uma precisa previsão do desempenho do sistema de energia solar térmica é a qualidade dos dados de radiação solar. Entretanto, muitos modelos preditivos de rendimento de energia solar dependem de dados meteorológicos típicos anuais com resolução temporal mínima de uma hora. (Ernst e Gooday, 2019).

Allouhi *et al.* (2017) aplicaram um método de custo do ciclo de vida para selecionar o melhor tamanho dos principais parâmetros de projeto SHIP para uma empresa marroquina de processamento de leite. A simulação foi realizada com dados de irradiação coletados a cada hora.

Buscemi *et al.* (2018) desenvolveram um modelo TRNSYS para simular o desempenho energético de SHIP com armazenamento para uma fábrica de macarrão. Além disso, geraram um TMY para definir a cada hora, parâmetros climáticos a serem utilizados como insumo para simulações.

Ernst e Gooday (2019) perceberam que a resolução temporal pode ter impacto significativo na distribuição de irradiância devido a flutuações em curto espaço de tempo, causadas por exemplo, pelo efeito de aprimoramento da nuvem para sistemas fotovoltaicos. Sendo assim, dados com resolução de até 10 minutos oferecem uma melhoria significativa em relação aos conjuntos de dados por hora.

Pelo fato da grande maioria dos projetos de SHIP serem modelados através de dados meteorológicos com resolução temporal máxima de 1 (uma) hora e esses dados por essência não serem sensíveis às variações dos níveis de radiação solar instantâneas, qual seria o impacto de uma resolução temporal maior (30 minutos, 10 minutos e 1 minuto) de dados solarimétricos na modelagem do desempenho de sistemas de aquecimento solar térmico aplicados para indústria?

Este artigo apresenta os resultados da avaliação do impacto da resolução temporal de dados solarimétricos na previsão do comportamento de sistemas de aquecimento solar para sistemas industriais.

2. METODOLOGIA

2.1. Coleta e tratamento de dados solarimétricos

Foram coletados dados solarimétricos do ano de 2019, com resolução temporal de 1 minuto de uma estação solarimétrica instalada em Natal – RN, conforme Tab. 3. Após análise dos dados, foram identificados valores de

irradiância negativos nos horários noturnos, como observado no dia 01/10/2019 na Tab. 3. Como, nesses horários o valor da irradiância é zero, foi implementada uma rotina através de um código em Python para zerar esses valores negativos. Além disso, foram desconsideradas outras informações da tabela original como: record, estação, Tbat, temperatura máxima, umidade relativa, pressão, velocidade, direção e os valores de irradiância da coluna Rad2. Nesse mesmo código foi implementada a geração de novas planilhas com resoluções temporais de 10, 30 e 60 minutos, além da resolução temporal original de 1 minuto. Essas novas resoluções temporais foram gradadas a partir de médias dos dados de 1 minuto.

Tabela 3. **Dados originais da estação solarimétrica.**

Datetime	record	estacao	Tbat	Temp max	Temp med	HR	Press	Vel	Dir	Rad1	Rad2
01/10/2019 00:00	33860	ISI-ER	13,03	0	27,33	72,44	1006,982	NAN	NAN	-1,051	-1,051
01/10/2019 00:01	33861	ISI-ER	13,03	0	27,33	72,34	1007,021	NAN	NAN	-1,031	-1,031
01/10/2019 00:02	33862	ISI-ER	13,04	0	27,33	72,36	1006,941	NAN	NAN	-1,004	-1,004
01/10/2019 00:03	33863	ISI-ER	13,03	0	27,32	72,3	1006,942	NAN	NAN	-0,945	-0,945
01/10/2019 00:04	33864	ISI-ER	13,03	0	27,31	72,36	1006,903	NAN	NAN	-0,91	-0,91
01/10/2019 00:05	33865	ISI-ER	13,03	0	27,3	72,32	1006,902	NAN	NAN	-0,929	-0,929
01/10/2019 00:06	33866	ISI-ER	13,03	0	27,3	72,34	1006,901	NAN	NAN	-0,984	-0,984
01/10/2019 00:07	33867	ISI-ER	13,04	0	27,29	72,32	1006,901	NAN	NAN	-1,044	-1,044
01/10/2019 00:08	33868	ISI-ER	13,03	0	27,29	72,36	1006,9	NAN	NAN	-1,077	-1,077
01/10/2019 00:09	33869	ISI-ER	13,03	0	27,28	72,36	1006,862	NAN	NAN	-1,079	-1,079

Na Tabela 4 são apresentados os valores de irradiância com resolução temporal de 10 min. Nota-se que os valores de irradiância no período noturno foram zerados e as colunas com outras informações foram suprimidas, restando apenas às colunas “Datetime”, “Tempmed” e “Rad1”.

Tabela 4. **Dados tratados da estação solarimétrica.**

Datetime	Tempmed	Rad1
2019-10-01 00:00:00	27,308	0
2019-10-01 00:10:00	27,231	0
2019-10-01 00:20:00	27,143	0
2019-10-01 00:30:00	27,058	0
2019-10-01 00:40:00	27,006	0
2019-10-01 00:50:00	26,962	0
2019-10-01 01:00:00	26,921	0
2019-10-01 01:10:00	26,884	0
2019-10-01 01:20:00	26,867	0
2019-10-01 01:30:00	26,834	0

2.2. Modelagem do sistema de aquecimento solar

Para avaliação do sistema de aquecimento solar sob diferentes resoluções temporais, foi definida uma indústria têxtil que apresenta uma demanda mensal de água quente com temperatura de processo de 60°C e com uma vazão de consumo de 0,12 kg/s, com demanda fixa de 24 horas por dia e 7 dias por semana.

O Sistema de Aquecimento Solar - SAS é composto por 36 coletores de placa plana conectados por 12 baterias (3 coletores em paralelo) em paralelo e um reservatório térmico, responsável por armazenar a água aquecida nos coletores. As especificações do coletor são apresentadas na Tab. 5 (Techniques d’Application, 2012).

Tabela 5. Especificações coletor solar plano.

Parametros coletor solar WTS F1 – type K1 (EN ISO 9806)	
Área coletora total (m ²)	2,581
Taxa de fluxo (l.h-1.m-2)	65
Eficiência máxima do coletor η_0	0,721
Coefficiente de perda de calor primeira ordem a_1 (W.m-2.K-1)	3,236
Coefficiente de perda de calor segunda ordem a_2 (W.m-2.K-2)	0,013

Além do SAS, foi modelado um Sistema de Aquecimento Auxiliar –SAA de passagem, necessário para suprir a demanda do processo quando a energia armazenada no reservatório térmico não atender à demanda de calor do processo. Na Figura 1 é apresentado o sistema de aquecimento solar estudado.

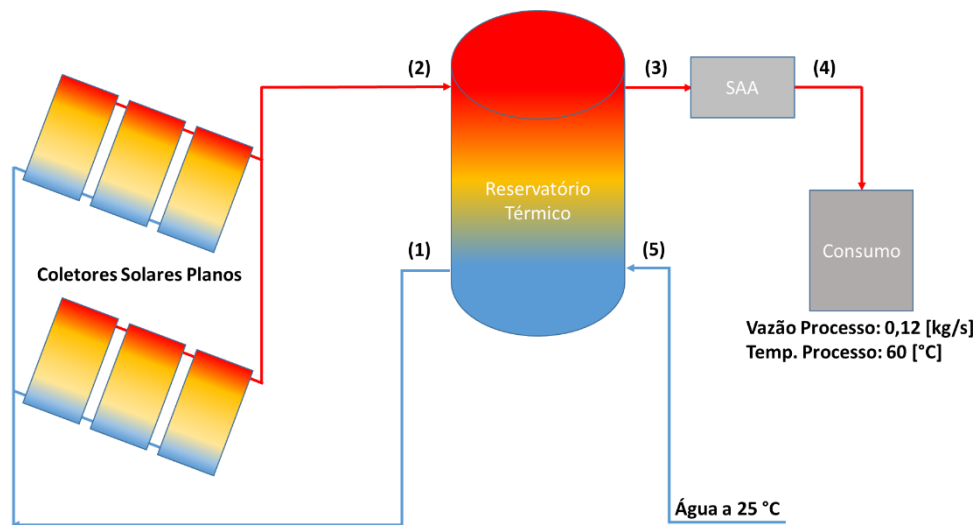


Figura 1. Configuração do Sistema de Aquecimento Solar.

Em períodos diurnos, quando há incidência de irradiação sobre os coletores, a água sai do reservatório térmico (1) e passa pelos coletores, onde a mesma é aquecida e enviada de volta para o reservatório (2). Na saída (3) a água passa pelo SAA (somente é ligado quando a temperatura da água está abaixo de 60 °C) e chega no processo, onde será consumida. Como essa água é consumida e não retorna para o sistema de aquecimento, uma água nova é inserida no reservatório pela entrada (5). Nos períodos noturnos ou quando não há incidência de irradiação solar, SAA é ligado para atender à demanda do processo. Todo o sistema foi modelado como ideal, desconsiderando toda e qualquer perda de calor.

2.3. Modelagem matemática

A eficiência do coletor solar pode ser calculada por meio da Eq. (1), levando em consideração que não há perdas no sistema por ângulo de incidência da irradiação (García e Torres, 2015).

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \left(\frac{T_m - T_{amb}}{G} \right) - a_2 \cdot \left(\frac{T_m - T_{amb}}{G} \right)^2 \quad (1)$$

onde:

η – é a eficiência do coletor solar

η_0 – é a eficiência máxima do coletor solar

a_1 – é o coeficiente de perda de calor de primeira ordem a_1 (W.m-2.K-1)

a_2 – é o coeficiente de perda de calor de primeira ordem a_2 (W.m-2.K-1)

T_m – é a temperatura média entre as temperaturas de entrada e saída do coletor (K)

T_{amb} – é a temperatura ambiente (K)

G – é a irradiância incidente sobre o coletor solar (W.m-2)

Para simulação do sistema de aquecimento solar apresentado, foi criado, em Python, um código para calcular a quantidade de energia disponibilizada pelo SAS, quantidade de energia consumida de forma instantânea (CI), ou seja, consumida no momento em que o SAS estava entregando essa energia, total de energia armazenada no reservatório térmico (ARM) e consumo do SAA, necessário para atender o consumo de energia térmica do processo (CON), para cada uma das resoluções temporais, conforme Fig. 2.

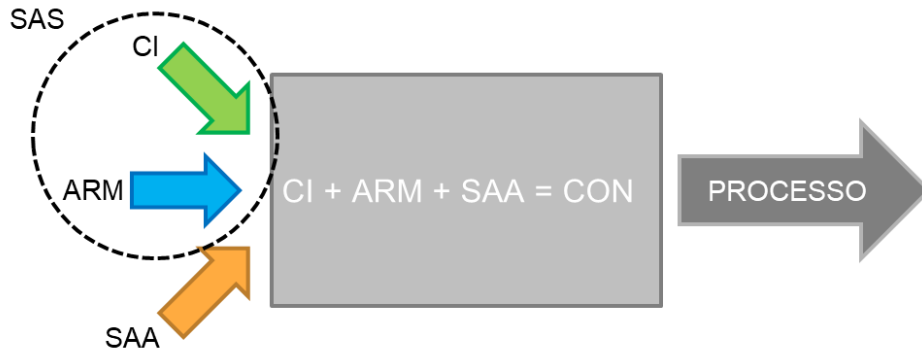


Figura 2. Esquema do modelo matemático do sistema.

O SAS foi calculado a partir da Eq. (2). A cada iteração do código, por linha de dados das planilhas com diferentes resoluções temporais, era calculada uma eficiência para o arranjo de coletores solares e por sua vez, o cálculo do SAS.

$$SAS = A_{ct} \cdot n_c \cdot \sum_{i=t_i}^{i=t_f} \eta_i \cdot G_i \cdot \Delta t_i \quad (2)$$

onde:

SAS – é a quantidade de energia térmica gerada pelo sistema de aquecimento solar (Wh)

i – é a iteração

t_i – é o instante inicial

t_f – é o instante final

Δt_i – é a resolução temporal (h)

η_i – é a eficiência do coletor solar

A_{ct} – é a área coletora total (m²)

n_c – é o número de coletores

G_i – é a irradiância incidente sobre o coletor solar (W.m⁻²)

Uma parcela do SAS é consumida pelo processo de forma instantânea e outra parte é armazenada no reservatório térmico.

Como apresentado na Fig. 2, o consumo de energia para o SAA é a diferença entre o consumo de energia do processo e o consumo instantâneo mais a energia armazenada. O consumo de energia térmica do processo é calculado a partir da Eq. (3).

$$CON = c_p (T_p - T_{amb}) \cdot \sum_{i=t_i}^{i=t_f} \dot{m}_i \cdot \Delta t_i \quad (3)$$

onde:

CON – é consumo de energia térmica do processo (Wh)

c_p – é o calor específico da água (kJ.kg⁻¹.K⁻¹)

T_p – é a temperatura do processo (K)

T_{amb} – é a temperatura ambiente (K)

i – é a iteração

t_i – é o instante inicial

t_f – é o instante final

$\dot{m}_i$ – é a vazão mássica de água do processo (kg.s⁻¹)

Δt_i – é a resolução temporal (h)

E por fim, a demanda do processo é calculada por meio da Eq. (4).

$$DEM = \dot{m} \cdot c_p (T_p - T_{amb}) \quad (4)$$

onde:

DEM – é a demanda do processo (W)

$\dot{m}$ – é a vazão mássica de água do processo (kg.s⁻¹)

c_p – é o calor específico da água (kJ.kg⁻¹.K⁻¹)

T_p – é a temperatura do processo (K)

T_{amb} – é a temperatura ambiente (K)

A fração solar f do representa quanto da energia térmica consumida pelo processo foi proveniente do SAS. A fração solar é calculada, conforme Eq. (5).

$$f = \frac{SAS}{CON} \quad (4)$$

onde:

f – é a fração solar

SAS – é a quantidade de energia térmica gerada pelo sistema de aquecimento solar (Wh)

CON – é consumo de energia térmica do processo (Wh)

3. RESULTADOS

No Gráfico 6, observa-se a irradiância solar ao longo do dia 21 dezembro de 2019 em duas diferentes resoluções temporais (1, 10 e 30 minutos e 1 hora). Foi utilizado este dia pelo fato de ser o início de verão no hemisfério sul. Nota-se que a irradiância solar a cada 1 minuto sofre oscilações muito maiores do que a irradiância solar nas demais resoluções temporais. Além disso, para uma resolução de 1 minuto, os picos de irradiância solar são maiores do que os maiores valores de irradiância solar em resoluções menores. Por outro lado, os vales também são mais significativos nos dados a cada 1 minuto. Logo, percebe-se que os valores de irradiância solar sofre alguma flutuação quando observado sob diferentes resoluções temporais. Ernst e Gooday (2019) descobriram que a resolução temporal pode ter um impacto significativo na distribuição de irradiância. A irradiação solar é sujeita a fortes flutuações em escalas de tempo curtas, o que é, por exemplo, causado pelo efeito das nuvens.

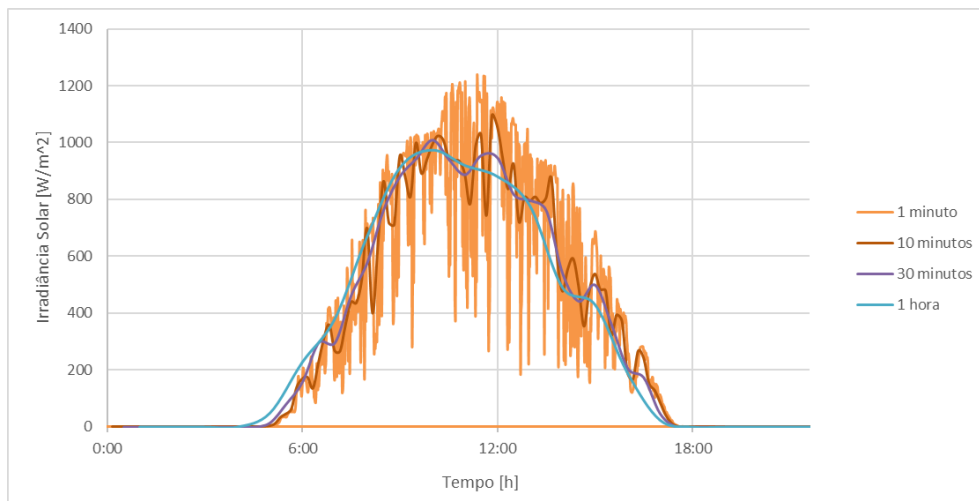


Figura 3. Perfil de irradiância solar diária em diferentes resoluções temporais para o dia 21/12/2019.

O sistema de energia solar térmico proposto foi simulado em todos os meses do ano em diferentes resoluções temporais (1 hora, 30 minutos, 10 minutos e 1 minuto).

A fração solar, energia produzida pelo SAS, consumo do sistema de auxiliar e a energia armazenada no reservatório térmico foram comparados a fim de avaliar o impacto da resolução temporal dos dados solarimétricos na modelagem de sistemas de aquecimento solar térmico e os resultados serão apresentados a seguir.

Na Figura 4, são apresentadas as frações solares do sistema para cada resolução temporal. Nota-se que, nos meses de janeiro, fevereiro e agosto a dezembro, as frações solares foram superiores a 80%. Nos outros meses, a variação foi entre 60 e 80%.

Comparando a frações solares em relação às resoluções temporais, percebe-se uma diminuição da fração solar na medida em que a resolução temporal vai aumentando, ou seja, de 1 hora para 1 minuto. Isso acontece em todos os meses do ano. Por exemplo, no mês de outubro as frações solares para resoluções temporais de 1 hora, 30 minutos, 10 minutos e 1 minuto foram, respectivamente: 97,31%, 96,84%, 96,24% e 93, 41%. Nota-se uma pequena diferença entre os três primeiros valores de fração solar, entretanto, observa-se uma diferença considerável entre a fração solar na resolução temporal de 1 hora e 1 minuto.

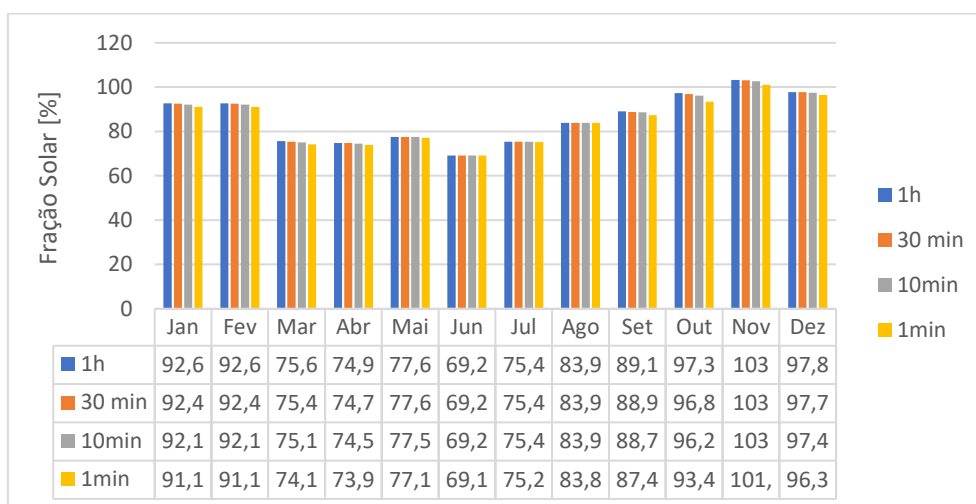


Figura 4. Frações solares do SAS em diferentes resoluções temporais.

Na Figura 5, é apresentado o total de energia térmica produzida pelo sistema de aquecimento solar em diferentes resoluções temporais para cada mês do ano. Esse gráfico segue a mesma tendência do gráfico anterior, vez que a demanda do processo estudado foi constante. O SAS produziu mais energia nos meses de outubro a janeiro e, para esse mesmo período, a variação de energia produzida pelo sistema entre resoluções temporais também foi maior. Utilizando o mês de novembro como exemplo, as energias produzidas pelo SAS para as resoluções temporais de 1 hora, 30 minutos, 10 minutos e 1 minuto foram: 13071,19, 13044,45, 12993,06 e 12798,63 kWh respectivamente. Já para o mês de junho foram: 8756,12; 8755,83; 8755,50 e 8751,00 kWh respectivamente. Nota-se que na medida que a resolução temporal aumenta, a energia produzida diminui. Além disso, a diferença entre a energia produzida pelo SAS no mês de novembro para a resolução temporal de 1 hora e 1 minuto é mais significativa comparada ao mês de junho, mostrando que quanto maior a o SAS, maior será a diferença entre as estimativas de produção de energia para diferentes resoluções temporais.

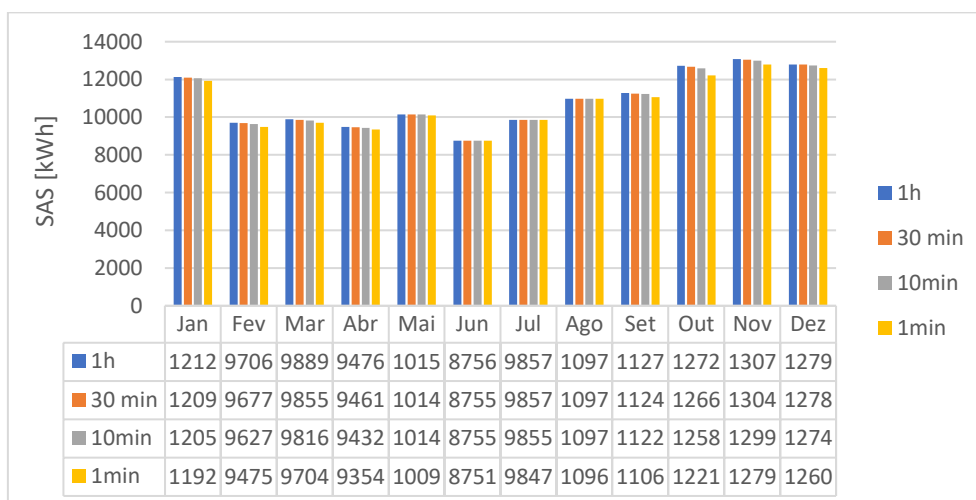


Figura 5. Energia térmica produzida pelo SAS em diferentes resoluções temporais.

Nos meses centrais do ano, onde a incidência de radiação solar é menor no hemisfério sul, o sistema de aquecimento auxiliar é mais exigido para atender à demanda térmica do processo. A Figura 6 apresenta o consumo do SAA para as diferentes resoluções temporais. Nota-se que nos meses, no qual a contribuição do SAS foi menor, o SAA foi maior. Comparando o consumo entre as resoluções temporais, é notório o comportamento inverso ao da fração solar e geração de energia do SAS, onde a estimativa do consumo do SAA aumenta com o aumento da resolução temporal.

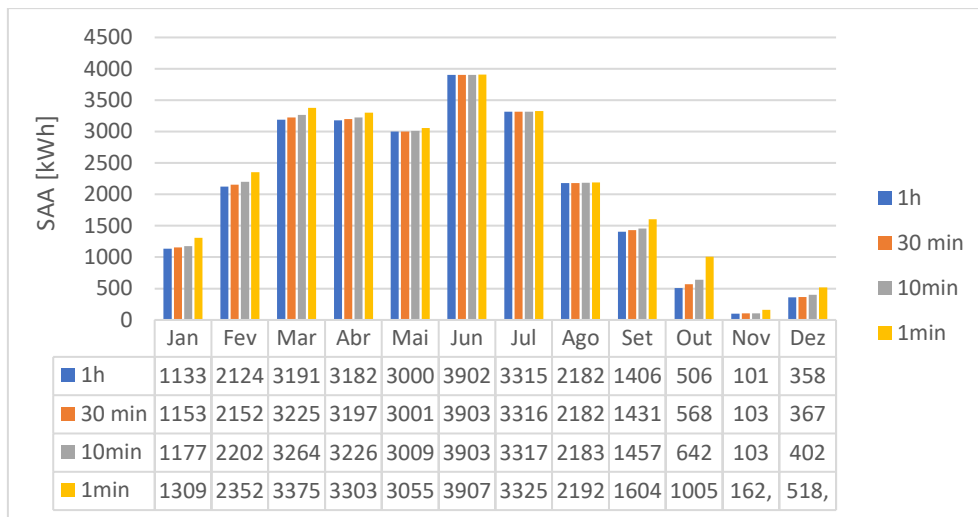


Figura 6. Consumo do SAA em diferentes resoluções temporais.

Seguindo a lógica do sistema como foi explicado anteriormente na metodologia, a energia produzida pelo SAS e que não é consumida de forma instantânea, devido a produção de energia do SAS ser maior que o consumo do processo, é armazenada no reservatório térmico para ser utilizado quando o SAS não for suficiente para atender a demanda do processo e atuar juntamente com o SAS. Na Figura 7, nota-se que nos meses em que o SAS produziu mais energia, foram os meses em que o reservatório térmico teve um maior armazenamento de energia.

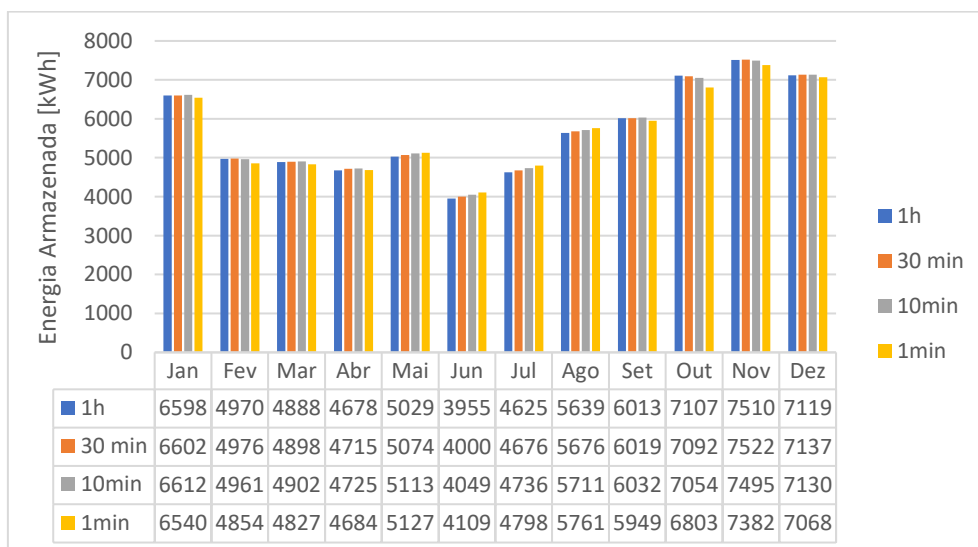


Figura 7. Energia armazenada no reservatório térmico em diferentes resoluções temporais.

Em suma, a variação entre as resoluções temporais intermediárias, 30 e 10 minutos, são menores, quando comparadas com os extremos (1 hora e 1 minuto). Desta forma, serão apresentadas a seguir comparações entre as resoluções temporais de 1 hora e 1 minuto para mostrar de forma mais clara o impacto da resolução temporal na previsão do comportamento de sistemas de energia solar térmico.

A Tabela 6 mostra a variação entre os parâmetros do sistema utilizando dados solarimétricos horários e dados solarimétricos a cada 1 minuto. Na primeira coluna da tabela, percebe-se que a modelagem do sistema utilizando dados horários superestima a energia produzida pelo SAS em todos os meses. No mês de outubro, o SAS produz cerca de 4,0% menos energia conforme utilização de dados solarimétricos com resolução de 1 minuto. Já o sistema auxiliar é subestimado em todos os meses do ano especialmente os meses em que ele é menos exigido, ou seja, a utilização de dados horários médio reduz a estimativa de quantidade de energia a ser produzida pelo sistema de aquecimento auxiliar para atender a demanda do processo. Vale ressaltar que nos meses os quais o SAA é menos exigido, a diferença é extremamente excessiva como nos meses de outubro, novembro e dezembro. Entretanto, isso se deve ao valor extremamente baixo de energia produzida pelo SAA nesses meses e qualquer variação tanto positiva quanto negativa ocasiona um impacto maior no dimensionamento desse sistema para esses meses.

O reservatório térmico não segue um padrão definido como o SAS e o SAA. Nos meses das estações de verão e primavera (janeiro, fevereiro, março, setembro, outubro, novembro e dezembro), o reservatório térmico é superestimado quando se utiliza dados solarimétricos horários em relação aos dados de 1 minuto. Já nos meses das estações de outono e inverno (abril, maio, junho e julho), o reservatório térmico é subestimado.

Tabela 6. Comparação das variáveis do sistema para as resoluções temporais (1 hora e 1 minuto).

Meses	Energia Produzida SAS %	Consumo Instantâneo SAS %	Consumo SAA %	Total de energia armazenada %	Fração Solar %
Janeiro	1,67%	2,62%	-15,54%	0,88%	1,68%
Fevereiro	2,38%	2,44%	-10,75%	2,32%	2,39%
Março	1,87%	2,48%	-5,78%	1,24%	1,87%
Abril	1,29%	2,68%	-3,84%	-0,14%	1,28%
Maio	0,55%	3,01%	-1,83%	-1,96%	0,55%
Junho	0,06%	3,33%	-0,13%	-3,91%	0,06%
Julho	0,11%	3,51%	-0,31%	-3,74%	0,11%
Agosto	0,10%	2,51%	-0,47%	-2,18%	0,11%
Setembro	1,85%	2,74%	-14,04%	1,07%	1,86%
Outubro	4,00%	3,66%	-98,56%	4,27%	4,01%
Novembro	2,09%	2,60%	-61,31%	1,71%	2,08%
Dezembro	1,47%	2,41%	-44,66%	0,71%	1,46%

A Figura 8 apresenta os valores superestimados do SAS na resolução temporal de 1 hora em comparação com 1 minuto. Percebe-se que nos meses de setembro a fevereiro, o SAS foi mais superestimado do que nos meses maio a agosto.

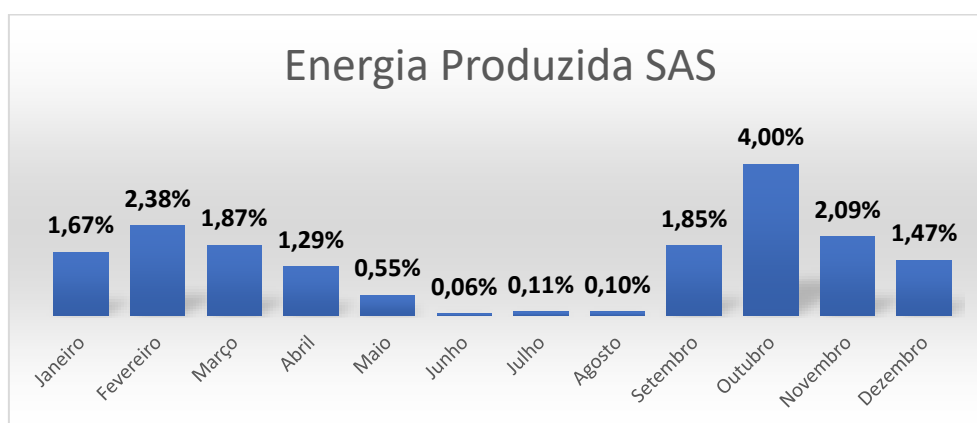


Figura 8. Percentual de variação da energia produzida pelo SAS para a resolução temporal de 1 hora comparada à resolução temporal de 1 minuto.

O impacto da resolução temporal no consumo auxiliar pode ser visto na Fig. 9. Esta figura apresenta os percentuais de consumo subestimados na resolução temporal de 1 hora em comparação com 1 minuto. Os percentuais negativos representam que o consumo do sistema de aquecimento solar foi maior para a resolução temporal de 1 minuto do que para a resolução horária. Como já mencionado, os meses de outubro a janeiro não necessitaram utilizar o SAA como os outros meses e por isso, qualquer variação da estimativa impacta mais na previsão do desempenho do sistema.

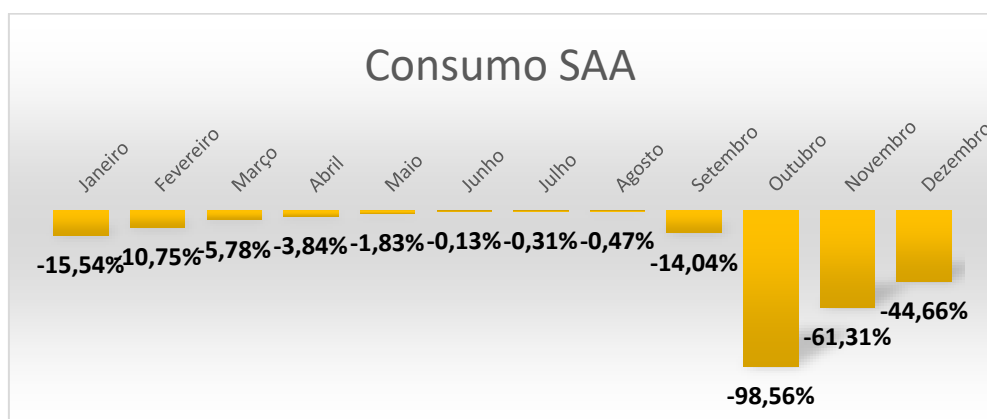


Figura 9. Percentual de variação do consumo do SAA para a resolução temporal de 1 hora comparado à resolução temporal de 1 minuto.

O reservatório térmico apresentou variações positivas e negativas durante o ano comparando as duas resoluções temporais, horária e de 1 minuto. Essa variação sem um padrão definido também foi observada quando comparadas

resoluções temporais diferentes como (1 hora e 30 minutos; 1 hora e 10 minutos). Nos meses de janeiro, fevereiro, março, setembro, outubro, novembro e dezembro, o reservatório foi superestimado. Já nos outros meses, o reservatório foi subestimado. O comportamento do reservatório térmico pode ser visto na Fig. 10. Percentual positivo significa que os valores de energia armazenada aplicando dados solarimétricos com resolução temporal horária são maiores do que os valores de energia armazenada para resolução temporal de 1 minuto.

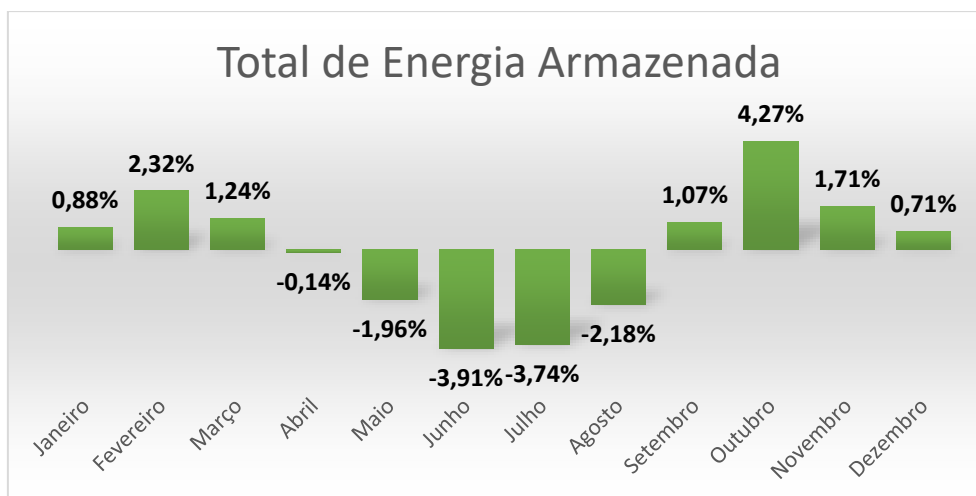


Figura 10. Percentual de variação do total de energia armazenada para a resolução temporal de 1 hora comparado à resolução temporal de 1 minuto.

De acordo com a Weather Spark (2019), em Natal-RN, a porcentagem média de céu encoberto por nuvens sofre significativa variação sazonal ao longo do ano. A época menos encoberta do ano em Natal começa por volta de 30 de maio e dura 4,7 meses, terminando em torno de 21 de outubro. O mês menos encoberto do ano em Natal é julho, durante o qual, em média, o céu está sem nuvens. A época mais encoberta do ano começa por volta de 21 de outubro e dura 7,3 meses, terminando em torno de 30 de maio. Essa época mais encoberta por nuvens está de acordo com os meses nos quais a variação da energia produzida pelo SAS utilizando dados solarimétricos com resolução temporal horária em comparação com 1 minuto é maior, ou seja, outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. Logo, pode-se concluir que o efeito das nuvens impacta a irradiância solar em intervalos curtos de tempo conforme Ernst e Gooday (2019) afirmaram em seu artigo e o seu efeito pôde ser visto na Fig. 3.

O impacto anual no desempenho do sistema de energia solar é resumido na Tab. 7. Percebe-se uma diminuição da energia produzida pelo SAS e a fração solar com o aumento da resolução temporal. Além disso, houve um aumento do consumo do SAA com o aumento da resolução temporal. Por fim, não foi possível concluir o comportamento do reservatório térmico quando são utilizados dados solarimétricos com resolução temporal diferente de 1 hora. Diferente da energia produzida pelo SAS e da energia consumida pelo SAA, a energia armazenada no reservatório não seguiu um padrão bem definido alternando entre variações positivas e negativas entre diferentes resoluções temporais. É necessário avaliar o sistema com uma demanda de processo menor do que 24 horas para avaliar o comportamento do reservatório térmico. Pelo fato de o processo ter essa demanda, toda a energia produzida pelo SAS é consumida durante a noite quando não há irradiância solar disponível. Logo, uma modelagem desse sistema aplicando uma demanda de 12 horas seria mais interessante para concluir melhor o comportamento do reservatório térmico utilizando diferentes resoluções temporais. Além disso, a fração solar pode ter influenciado negativamente o comportamento do reservatório térmico, pois o SAS atendia quase que a totalidade do consumo do processo, com isso, a energia consumida instantaneamente era muito relevante, com isso, o sistema de armazenamento térmico não era utilizado.

Tabela 7. Comparação dos valores anuais para as resoluções temporais (1 hora e 1 minuto).

Parâmetros	1 hora	30 minutos	10 minutos	1 minuto
Energia Produzida SAS [kWh]	130809,49	130577,69	130210,46	128807,85
Consumo SAA [kWh]	23484,03	23675,89	23948,10	26111,17
Total de Energia Armazenada [kWh]	68131,52	68388,73	68520,12	67905,74
Fração Solar	84,93%	84,78%	84,55%	83,64%

Diante disso, a modelagem de sistemas de energia solar térmica é impactada pela utilização de dados solarimétricos horários em comparação desses dados com resolução temporal de 1 minuto. Percebeu-se que o SAS é superestimado utilizando a resolução temporal horária e o sistema de energia auxiliar é subestimado. Essa variação pode impactar negativamente a produção como também a viabilidade econômica do sistema físico. Além disso, a utilização de dados solarimétricos com maior resolução gera resultados mais precisos em relação a valores horários.

4. CONCLUSÃO

Foi avaliado o impacto da resolução temporal de dados solarimétricos na previsão do desempenho do sistema de energia solar térmica aplicado a processos industriais. Percebeu-se através da análise dos resultados que a modelagem de sistemas com a utilização de dados solarimétricos com resolução temporal horária superestima a energia produzida pelo SAS, pois não é sensível ao efeito das nuvens o qual ocasiona o vale de irradiância solar. Durante o ano, a energia produzida pelo SAS utilizando dados solarimétricos horários foi maior do que o sistema utilizando dados a cada 30 minutos, 10 minutos e 1 minuto. Consequentemente, o sistema de energia auxiliar de aquecimento SAA é subestimado em todos os meses da análise. Não foi possível concluir qual o comportamento do reservatório térmico quando se utiliza dados solarimétricos com resolução temporal maior, pois em alguns meses do ano, o reservatório foi superestimado e em outros meses do ano ele foi subestimado nas três resoluções temporais diferentes da horária (30 minutos, 10 minutos e 1 minuto). Recomenda-se a modelagem desse sistema utilizando outra demanda de processo diferente de 24 horas e uma fração solar menor para poder avaliar qual o comportamento do reservatório térmico quando exposto a condições diferentes de processo. A modelagem de sistemas de energia solar térmica utilizando dados solarimétricos com resolução temporal de 01 minuto é relevante para a modelagem mais precisa dos sistemas, pois é mais sensível as alterações instantâneas da irradiância solar que ocorrem devido ao efeito das nuvens que impactam negativamente na conversão de energia solar em energia térmica. Além disso, é possível avaliar de forma mais precisa o consumo de energia do sistema de aquecimento auxiliar, pois ele é subestimado na previsão de desempenho do sistema levando em consideração aos dados solarimétricos com resolução horária.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao ISI-ER pela disponibilização dos dados solarimétricos e ao SENAI/CIMATEC, pelo suporte durante a preparação deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Sharma, Ashish K., et al., 2017. "Solar industrial process heating: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 78, pp. 124-137. doi: 10.1016/j.rser.2017.04.079.
- Ernst, Marco and Jack Gooday, 2019. "Methodology for generating high time resolution typical meteorological year data for accurate photovoltaic energy yield modelling". *Solar Energy*. Vol. 189, pp. 299-306. doi: 10.1016/j.solener.2019.07.069.
- Hahn, P. et al., 2018. "Energia Termossolar para a indústria: Brasil". *Solar Payback*. Web. 15 dez 2021 <https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user_upload/national_process_heat_bra_spb.pdf>.
- Allouhi, A., et al., 2017. "Design optimization of a multi-temperature solar thermal heating system for an industrial process". *Applied Energy*. Vol. 206, pp. 382-392. doi:10.1016/j.apenergy.2017.08.196.
- Buscemi, A.; Panno, D.; Ciulla, G.; Beccali, M.; Lobrano, V., 2018. "Concrete thermal energy storage for linear Fresnel collectors: exploiting the south mediterranean's solar potential for agri-food processes". *Energy Conversion And Management*. Vol. 166, pp. 719-734. doi:10.1016/j.enconman.2018.04.075.
- Techniques d'Application, 2012. *Commission chargée de formuler des Avis Techniques*. Avenue Jean Jaurès Paris, França, 31 p.
- García, Ignacio, and Torres, José Luis, 2015. "Assessment of the adequacy of EN ISO 15927-4 reference years for photovoltaic systems". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. Vol. 23, No. 12, pp. 1956-1969. doi: doi/10.1002/pip.2617.
- Weather Spark, 2019. "Clima e condições meteorológicas médias em Natal no ano todo". *Weather Spark*. Web. 22 dez 2021 <<https://pt.weatherspark.com/y/31427/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Natal-Brasil-durante-o-ano#Sections-Clouds>>.

RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EVALUATION OF THE IMPACT OF TEMPORAL RESOLUTION OF SOLARIMETRIC DATA IN PREDICTING THE BEHAVIOR OF SOLAR HEATING SYSTEMS

João Pedro Feitosa dos Santos Rocha, j.rocha@aln.senaicimatec.edu.br¹

Paulo Roberto Freitas Neves, paulo.neves@fieb.org.br¹

Alex Álisson Bandeira Santos, alex.santos@fieb.org.br¹

¹Centro Universitário SENAI CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador-BA, CEP: 41.650-010

Abstract. Heat demands at temperatures up to 150 °C can be met by solar heating systems. However, decision makers in industrial plants question the functioning of these systems, due to the risk that a poorly dimensioned system can cause downtime in the company's operation. In this way, the precision in the estimation of thermal energy generation in solar heating systems for industrial processes (SHIP) is of extreme importance. A relevant parameter for an accurate estimate is the quality of solar irradiation data, normally used in forecast models with a maximum temporal resolution of one hour. The objective of this work is to evaluate the impact of temporal resolution of solarimetric data in predicting the behavior of SHIP systems. For the development of the work, a consumption profile was defined for a textile industry that presents a monthly demand for hot water with a process temperature of 60 °C, with a consumption flow of 0.12 kg/s and a fixed demand of 24 hours a day, 7 days a week and consists of a solar water heating system including an auxiliary heating system and thermal storage tank. Irradiation and ambient temperature measurement data over a period of one year were collected from the solarimetric station installed at the SENAI Institute for Innovation in Renewable Energies (ISI-ER), located in Natal-RN, and the system behavior was simulated and analyzed under different conditions. temporal resolutions (between 1 and 60 minutes). For a greater temporal resolution, the results showed a reduction in the thermal energy generated by the solar heating system and an increase in the estimated consumption for the auxiliary heating system. It is possible to conclude that a higher temporal resolution (1 minute) is relevant mainly in the more precise dimensioning of the auxiliary heating system (AHS) and the solar heating system (SHS).

Keywords: Solar Heating. Thermal Energy. SHIP. Temporal Resolution