

Energia Solar e Eólica

Paulo Jayme Pereira Abdala
(Organizador)

 **Atena**
Editora

Ano 2019

Paulo Jayme Pereira Abdala
(Organizador)

Energia Solar e Eólica

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Karine de Lima

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E56 Energia solar e eólica [recurso eletrônico] / Organizador Paulo Jayme Pereira Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Energia Solar e Eólica; v. 1)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-066-7

DOI 10.22533/at.ed.667192201

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Energia eólica. 3. Energia solar. I. Abdala, Paulo Jayme Pereira.

CDD 621.042

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

As chamadas energias renováveis, também conhecidas como energias alternativas ou ainda energias limpas são três denominações possíveis para qualquer forma de energia obtida por meio de fontes renováveis, e que não produzem grandes impactos ambientais negativos. Atualmente, com a grande preocupação mundial em compensar as emissões de CO₂, o consumo deste tipo de energia tem sido o foco de governos e empresas em todo globo.

Neste sentido, o Brasil possui uma matriz energética bastante limpa, onde predomina o uso de hidrelétricas, apesar do crescimento do uso de termelétricas, as quais são abastecidas por combustível fóssil. No Brasil, o setor energético é responsável por grande parte das emissões de CO₂, ficando atrás somente do setor agrícola que reapresenta a maior contribuição para o efeito estufa brasileiro.

A energia proveniente do sol é a alternativa renovável mais promissora para o futuro e, por este motivo tem recebido maior atenção e também mais investimentos. A radiação solar gratuita fornecida pelo sol pode ser captada por placas fotovoltaicas e ser posteriormente convertida em energia elétrica. Esses painéis usualmente estão localizados em construções, como indústrias e casas, o que proporciona impactos ambientais mínimos. Esse tipo de energia é uma das mais fáceis de ser implantada em larga escala. Além de beneficiar os consumidores com a redução na conta de energia elétrica reduzem as emissões de CO₂.

Com relação à energia eólica, o Brasil faz parte do grupo dos dez países mais importantes do mundo para investimentos no setor. As emissões de CO₂ requeridas para operar esta fonte de energia alternativa são extremamente baixas e é uma opção atrativa para o país não ser dependente apenas das hidrelétricas. Os investimentos em parques eólicos vem se tornando uma ótima opção para neutralização de carbono emitidos por empresas, indústrias e etc.

Neste contexto, este EBOOK apresenta uma importante contribuição no sentido de atualizar os profissionais que trabalham no setor energético com informações extremamente relevantes. Ele está dividido em dois volumes contendo artigos práticos e teóricos importantes para quem deseja informações sobre o estado da arte acerca do assunto.

Paulo Jayme Pereira Abdala

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	10
UMA REVISÃO SOBRE AS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS ATUAIS	
Alexandre José Bühler Ivan Jorge Gabe Fernando Hoefling dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.6671922011	
CAPÍTULO 2	26
VALIDAÇÃO DE MODELOS DE COMPORTAMENTO TÉRMICO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO	
Bruna de Oliveira Busson Pedro Henrique Fonteles Dias Ivonne Montero Dupont Pedro Hassan Martins Campos Paulo Cesar Marques de Carvalho Edylla Andressa Queiroz Barroso	
DOI 10.22533/at.ed.6671922012	
CAPÍTULO 3	41
A GERAÇÃO SOLAR DE CALOR DE PROCESSOS INDUSTRIAIS NA PRODUÇÃO DE GESSO BETA DO POLO GESSEIRO DO ARARIPE	
André Vitor de Albuquerque Santos Kenia Carvalho Mendes	
DOI 10.22533/at.ed.6671922013	
CAPÍTULO 4	58
A UTILIZAÇÃO DO SILÍCIO NACIONAL PARA A FABRICAÇÃO DE PLACAS SOLARES: UMA REFLEXÃO DAS DIFICULDADES TECNOLÓGICA E FINANCEIRA	
Felipe Souza Davies Gustavo Luiz Frisso Matheus Vinícius Brandão	
DOI 10.22533/at.ed.6671922014	
CAPÍTULO 5	72
AEROPORTO DE VITÓRIA/ES: ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	
Ana Luiza Guimarães Valory Sidney Schaeffer Warley Teixeira Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.6671922015	
CAPÍTULO 6	87
ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO E POLICRISTALINO	
Suellen Caroline Silva Costa Janaína de Oliveira Castro Silva Cristiana Brasil Maia Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz	
DOI 10.22533/at.ed.6671922016	

CAPÍTULO 7	1043
ANÁLISE HARMÔNICA NOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS DE UMA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA	
Alessandro Bogila Joel Rocha Pinto Thales Prini Franchi Thiago Prini Franchi	
DOI 10.22533/at.ed.6671922017	
CAPÍTULO 8	120
ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO NO MODELO DE UMA ÁRVORE NA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA	
Bárbara de Luca De Franciscis Gouveia	
DOI 10.22533/at.ed.6671922018	
CAPÍTULO 9	139
ANÁLISE FINANCEIRA DE SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA FINANCIADOS EM PALMAS - TO	
Brunno Henrique Brito Maria Lúcia Feitosa Gomes de Melo	
DOI 10.22533/at.ed.6671922019	
CAPÍTULO 10	152
APLICAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO EM ESCOLAS MUNICIPAIS DA CIDADE DE CRUZ ALTA/RS: ANÁLISE DE IMPLANTAÇÃO E POTENCIAL DE ENERGIA GERADA	
Alessandra Haas Franciele Rohr Ísis Portolan dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.66719220110	
CAPÍTULO 11	165
APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT) EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
Augusto Hafemeister João Batista Dias Leonel Augusto Calliari Poltosi	
DOI 10.22533/at.ed.66719220111	
CAPÍTULO 12	181
AR CONDICIONADO SOLAR – CICLO DE ADSORÇÃO	
Rafael de Oliveira Barreto Pollyanne de Oliveira Carvalho Malaquias Matheus de Mendonça Herzog Luciana Carvalho Penha Lucio Cesar de Souza Mesquita Elizabeth Marques Duarte Pereira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220112	
CAPÍTULO 13	194
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO COLETOR SOLAR PLANO ACOPLADO EM SECADOR HÍBRIDO	
Raphaela Soares da Silva Camelo	

Ícaro da Silva Misquita
Thais Andrade de Paula Lovisi
Lizandra da Conceição Teixeira Gomes de Oliveira
Juliana Lobo Paes
Camila Lucas Guimarães

DOI 10.22533/at.ed.66719220113

CAPÍTULO 14 212

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE NOVO PROTÓTIPO DE FOTOBIORREATOR NÃO TRANSPARENTE PARA CULTIVO DE MICROALGAS COM ILUMINAÇÃO INTERNA ATRAVÉS DE POFS QUE RECEBEM A LUZ DE LENTES MONTADAS EM SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR

Gisel Chenard Díaz
Yordanka Reyes Cruz
Rene Gonzalez Carliz
Fabio Toshio Dino
Maurílio Novais da Paixão
Donato A. Gomes Aranda
Marina Galindo Chenard

DOI 10.22533/at.ed.66719220114

CAPÍTULO 15 225

AVALIAÇÃO DE WEBSITES BRASILEIROS PARA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE: PARÂMETROS DE ENTRADA E RESULTADOS

Marina Calcagnotto Mascarello
Letícia Jenisch Rodrigues

DOI 10.22533/at.ed.66719220115

CAPÍTULO 16 241

AVALIAÇÕES DE CUSTO E DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS TIPO SIGFI COM DIFERENTES PERÍODOS DE AUTONOMIA

Marta Maria de Almeida Olivieri
Leonardo dos Santos Reis Vieira
Marco Antonio Galdino
Márcia da Rocha Ramos

DOI 10.22533/at.ed.66719220116

CAPÍTULO 17 257

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO CONSIDERANDO O EFEITO DA ESTEIRA AERODINÂMICA DE TURBINAS ATRAVÉS DO MODELO DO DISCO ATUADOR

Luiz Fernando Pezzi
Adriane Prisco Petry

DOI 10.22533/at.ed.66719220117

CAPÍTULO 18 272

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE DIFERENTES BASES DE DADOS DE IRRADIAÇÃO - ESTUDO DE CASO EM CURITIBA

Danilo Carvalho de Gouveia
Jeanne Moro
Muza Iwanow
Rebecca Avença
Jair Urbanetz Junior

DOI 10.22533/at.ed.66719220118

CAPÍTULO 19	284
DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIES SUPERHIDROFÓBICAS COM EFEITO AUTOLIMPANTE PARA APLICAÇÕES EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
Lucélio Oliveira Lemos	
Magnum Augusto Moraes Lopes de Jesus	
Aline Geice Vitor Silva	
Angela de Mello Ferreira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220119	
CAPÍTULO 20	297
DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	
Stéphane Rodrigues da Silva	
Érica Tiemi Anabuki	
Luis Cláudio Gambôa Lopes	
DOI 10.22533/at.ed.66719220120	
CAPÍTULO 21	312
DO PETRÓLEO À ENERGIA FOTOVOLTAICA: A INSERÇÃO DO BRASIL NESTE NOVO MERCADO	
Emilia Ribeiro Gobbo	
Maria Antonia Tavares Fernandes da Silva	
Rosemarie Bröker Bone	
DOI 10.22533/at.ed.66719220121	
CAPÍTULO 22	330
EFEITO DO SOMBREAMENTO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
José Rafael Cápua Proveti	
Daniel José Custódio Coura	
Carlos Roberto Coutinho	
Adriano Fazolo Nardoto	
DOI 10.22533/at.ed.66719220122	
CAPÍTULO 23	342
ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA E DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO AO COMPLEXO AQUÁTICO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA	
Helena Flávia Napolini	
Gustavo Xavier de Andrade Pinto	
Julio Boing Neto	
Ricardo Rütther	
DOI 10.22533/at.ed.66719220123	
CAPÍTULO 24	354
ESTUDO DA SECAGEM INTERMITENTE DA MANGA UTILIZANDO SECADOR HÍBRIDO SOLAR-ELÉTRICO	
Camila Lucas Guimarães	
Juliana Lobo Paes	
Raphaela Soares da Silva Camelo	
Madelon Rodrigues Sá Braz	
Ícaro da Silva Misquita	
Lizandra da Conceição Teixeira Gomes de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220124	

CAPÍTULO 25	367
ANÁLISE PRÉVIA DO VALOR DA DEPENDÊNCIA DO SOLO PARA AS ATIVIDADES AGRÍCOLAS COM A POSSÍVEL IMPLANTAÇÃO DO PARQUE EÓLICO DA SERRA, EM SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS	
Antonio Robson Oliveira da Rosa Leonardo Beroldt Rafael Haag	
DOI 10.22533/at.ed.66719220125	
CAPÍTULO 26	379
APLICAÇÃO DE UM DVR EM AEROGERADORES SCIG E DFIG PARA AUMENTO DE SUORTABILIDADE FRENTE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	
Edmar Ferreira Cota Renato Amorim Torres Victor Flores Mendes	
DOI 10.22533/at.ed.66719220126	
CAPÍTULO 27	398
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO DE UMA REGIÃO COM TOPOGRAFIA COMPLEXA UTILIZANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	
William Corrêa Radünz Alexandre Vagtinski de Paula Adriane Prisco Petry	
DOI 10.22533/at.ed.66719220127	
CAPÍTULO 28	410
EDIFICAÇÃO DE ENERGIA POSITIVA: ANÁLISE DE GERAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR EM CURITIBA	
Larissa Barbosa Krasnhak Elis Almeida Medeiros de Mello Jair Urbanetz Junior Eloy Casagrande Junior	
DOI 10.22533/at.ed.66719220128	
CAPÍTULO 29	422
ESTAÇÃO METEOROLÓGICA WIFI DE BAIXO CUSTO BASEADO EM THINGSPEAK	
Renan Tavares Figueiredo Odélsia Leonor Sanchez de Alsina Diego Lopes Coriolano Eurípes Lopes de Almeida Neto Ladjane Coelho dos Santos Iraí Tadeu Ferreira de Resende Ana Claudia de Melo Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220129	
SOBRE O ORGANIZADOR	431

A GERAÇÃO SOLAR DE CALOR DE PROCESSOS INDUSTRIAIS NA PRODUÇÃO DE GESSO BETA DO POLO GESSEIRO DO ARARIPE

André Vitor de Albuquerque Santos

Mekatronik Indústria e Comércio de Automação
LTDA

Recife – Pernambuco

Kenia Carvalho Mendes

Universidade de Pernambuco

Recife – Pernambuco

RESUMO: O Polo Gesseiro do Araripe é o principal produtor nacional de gesso. Os problemas da sua matriz energética são considerados como questões chave para a continuidade das operações de produção e beneficiamento do gesso na região. Com condições de insolação favoráveis, estudos anteriores apontam a possibilidade de uso da radiação como fonte da energia necessária à produção de gesso. No entanto, falta uma avaliação mais consistente da questão, seguindo aspectos metodológicos condizentes com as especificidades da geração solar de calor de processos industriais, em que questões relativas à integração do sistema de geração solar ao processo industrial e a uma análise termoeconômica são analisadas. Tais questões foram tratadas de acordo com o proposto pela Agência Internacional de Energia, principalmente no que concerne aos aspectos de integração. O cálculo dos ganhos energéticos foi realizado com o auxílio de correlações que

forneem a energia útil anual em função das condições de radiação e de parâmetros técnicos de desempenho da tecnologia de coletor. De acordo com os estudos realizados, não há possibilidade de integração entre o sistema de geração solar e o atual processo produtivo empregado no Polo. As condições de geração, transporte e transferência de calor ao processo não permitem a elaboração de propostas de integração entre o sistema de geração solar e o processo produtivo. Do lado termoeconômico, a melhor condição analisada chega a reduzir o consumo de lenha em 26% e traz um retorno de investimento em mais de 9 (nove) anos. Por fim, ficou evidente que algumas medidas de eficiência energética, levantadas em investigações anteriores sobre o setor gesseiro do Araripe, se apresentam como investimentos de maior atratividade.

PALAVRAS-CHAVE: Polo Gesseiro do Araripe, produção de gesso beta, geração solar de calor de processos industriais.

ABSTRACT: The Araripe Gypsum Pole is the greatest plaster producer in Brazil. The problem involved in its energy matrix is considered as a key issue for the continuity of the plaster's production and processing operations in the region. With very favorable conditions, previous studies indicate the possibility of using solar radiation to produce the energy required for the

process production. However, a more consistent assessment study is lacking, following methodological aspects consistent with the specificities of solar heat in industrial processes, in which issues related to the integration of the solar generation system into the industrial process and to a thermoeconomic analysis are analyzed. These issues were investigated with in accordance with the proposal of the International Energy Agency, particularly as regards the integration aspects. The calculation of the energy yields was carried out with the aid of correlations that provide the annual useful energy in function of the radiation conditions and technical parameters of performance of the considered collector technology. According to the studies carried out, there is no possibility of integration between the solar generation system and the current process employed in the Pole. The conditions of generation, transportation and heat transfer to the process do not allow elaboration of integration proposals between the solar generation system and the production process. From the thermoeconomic perspective, the best condition analyzed reduces the firewood consumption by 26% and brings a return on investment of more than nine (9) years. Finally, it became clear that some energy efficiency projects, analyzed in previous researches on the Araripe gypsum sector, are investments that are more attractive.

KEYWORDS: Araripe Gypsum Pole, plaster production, solar heat for industrial processes.

1 | INTRODUÇÃO

O gesso beta, ou simplesmente gesso, é um dos principais materiais de construção civil utilizados no Brasil. Mais de 95% de sua produção nacional, assim como as principais reservas de sua matéria-prima, a gipsita, está concentrada no chamado Polo Gesseiro do Araripe (PGA) (HENRIQUES JR, 2013; SINDUSGESSO, 2014).

Atualmente, as principais problemáticas da cadeia produtiva do gesso se concentram nas especificidades da sua matriz energética, onde a lenha é, praticamente, a única fonte de energia térmica utilizada (SINDUSGESSO, 2014). Entretanto, estudos apontam que a vegetação local não possui capacidade energética para dar suporte à indústria do gesso, pois a quantidade de lenha produzida em áreas de manejo sustentável é de apenas 3% da demanda, levando à exploração da mata nativa, a Caatinga, sem qualquer controle e fiscalização (CAMPELLO, 2013; SILVA, 2009).

As exigências legais e sociais sobre as questões ambientais envolvendo o setor gesseiro, incompatíveis com o paradigma de exploração descontrolada da Caatinga, e a preocupação com a segurança do fornecimento da lenha, cada vez mais difícil de ser adquirida, produzem um ambiente de incertezas no setor, que vê, a partir das operações da ferrovia Transnordestina, a possibilidade de transferência de grande parte da cadeia produtiva para regiões com maiores perspectivas de segurança energética (ANDRADE; FARIAS; MOUTINHO, 2013; SINDUSGESSO, 2014).

Na busca de alternativas à lenha, os altos níveis de insolação da região do Polo Gesseiro do Araripe trouxeram à tona a possibilidade do uso da energia solar como fonte do calor necessário (ROLIM; FRAIDENRAICH; VILELA, 2012). No entanto, aspectos sobre a integração do sistema de geração solar ao atual processo produtivo utilizado na região e o seu desempenho termoeconômico são lacunas que evidenciam a necessidade de estudos de avaliação mais específicos sobre essa alternativa energética.

Quando um sistema de geração solar de calor de processo industrial é instalado em uma planta industrial já existente, o principal desafio consiste em definir a situação mais adequada para a integração entre os dois sistemas, o que torna as condições existentes de organização da geração, do fornecimento e do consumo de energia térmica essenciais para as possibilidades de integração (MURPHY, 2015; MUSTER; SCHMITT; SCHNITZER, 2015).

De acordo com a metodologia de avaliação da Agência Internacional de Energia (IEA) (MUSTER *et al.*, 2015), o primeiro passo consiste em determinar os pontos que demandam calor dentro do processo produtivo, os chamados pontos de integração. Para cada ponto de integração devem ser estimadas as respectivas temperaturas de fornecimento de calor, assim como o perfil de demanda térmica (diário, semanal e mensal), ou seja, a curva que apresenta o comportamento temporal da carga térmica fornecida (MUSTER, 2015), de forma a permitir o cálculo do total anual de energia térmica consumida; sendo, então, os pontos de integração identificados, devem ser classificados de acordo com uma matriz de indicadores, proposta pela IEA (HASSINE, 2015). Por fim, os melhores pontos devem ser selecionados e estudados mais profundamente a partir de uma análise termoeconômica (SCHMITT, 2015a), onde, de acordo com os conceitos de integração passíveis de utilização (Schmitt, 2015b), são determinados os ganhos energéticos e econômicos advindos do uso do recurso solar. O resultado desta análise serve de base para a tomada de decisão sobre a estratégia de integração a ser utilizada (HELMKE; HEß, 2015), caso os indicadores de desempenho (PLATZER, 2016) acenem para um horizonte de viabilidade do uso do recurso solar.

2 | A PRODUÇÃO DE GESSO BETA NO POLO GESSEIRO DO ARARIPE

A produção de gesso no PGA ocorre de modo muito uniforme em todas as empresas, basicamente em duas etapas sucessivas: (i) cominuição; e (ii) calcinação. Na primeira, a gipsita extraída das minas tem sua dimensão reduzida em britadores de mandíbula e moinhos de martelos, acionados por motores elétricos, de forma a conferir a granulometria adequada às partículas minerais.

Na calcinação ocorre a decomposição térmica da gipsita, cujo objetivo é a eliminação de parte da água de cristalização combinada a sua estrutura, para a

formação do gesso, com a coprodução de vapor d'água. Esse processo ocorre em fornos industriais, onde a gipsita é introduzida em condições ambiente e, ao receber energia térmica, experimenta uma elevação em sua temperatura até alcançar o patamar característico da transição de fase (transformação de gipsita em gesso), em torno dos 130 °C (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2008). Toda essa demanda térmica (sensível e latente) é, teoricamente, de 597,20 kJ/kg de gesso produzido (KUNTZE, 2009).

Atualmente, praticamente todas as empresas do Araripe utilizam o mesmo equipamento de calcinação: o forno marmitta rotativo de queima indireta (SINDUSGESSO, 2014), cuja ilustração pode ser visualizada na Figura 1.

A energia térmica necessária ao processo é obtida a partir da combustão de lenha, principalmente na forma de toras. Esta tecnologia de calcinação apresenta um regime de produção intermitente, em bateladas, com tempo de ciclos de produção de cerca de 60 minutos (URBANO, 2013).

No centro da Figura 1 pode-se visualizar um corpo cilíndrico metálico, o forno propriamente dito. No seu interior é que fica contido o leito de gipsita em calcinação. A lenha é alimentada pelo lado esquerdo da figura, caindo sobre o conjunto de grelhas inclinadas no lado esquerdo inferior, por onde é soprado o ar de combustão. Os gases quentes gerados escoam pela lateral direita (caminho de menor perda de carga), percorrendo o contorno da câmara de combustão e saindo pelo sistema de exaustão do lado esquerdo superior. Durante esse percurso, esses gases trocam calor com o cilindro metálico, que por sua vez transfere energia para o leito de gipsita. Este corpo cilíndrico é rotativo, no sentido anti-horário, promovendo uma homogeneização do leito e um empuxo adicional que favorece o escoamento dos gases de combustão.

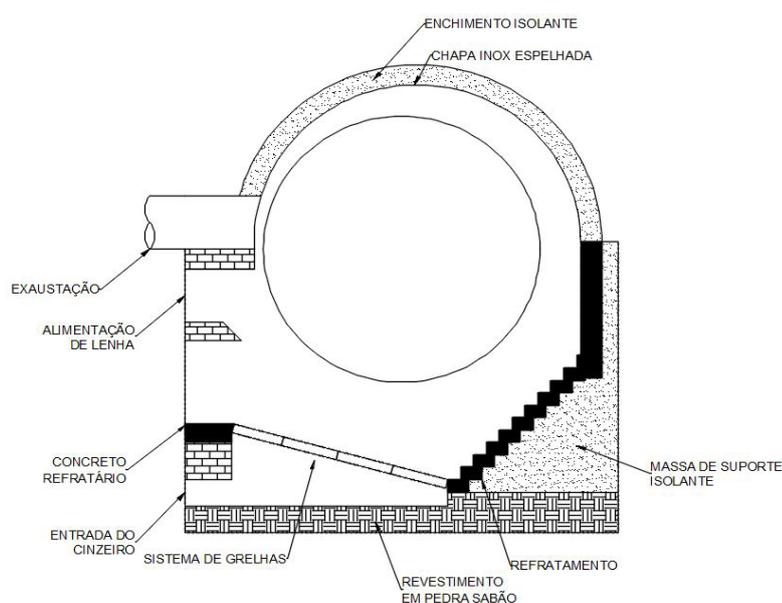


Figura 1 – Secção transversal do forno marmitta rotativo utilizado no PGA.

O modo de alimentação da lenha é manual, condicionando o fornecimento de energia a sensibilidade e experiência do operador do forno. A alimentação do ar de combustão é realizada por um soprador que capta o ar atmosférico e o injeta na fornalha. Não há nenhuma forma de controle sobre a vazão do ar utilizado para a combustão.

De modo geral, o nível de instrumentação e controle adotado nas empresas de calcinação do Araripe é extremamente baixo. Poucas, entre maiores calcinadoras, utilizam sistemas de supervisão e controle para garantir condições padronizadas das variáveis de processo e, dessa forma, obter o controle de performance do equipamento.

Outro conceito pouco utilizado pelas empresas calcinadoras da região é o de recuperação do calor. Não há aproveitamento de parte da energia térmica contida nos gases quentes expelidos pelo sistema de exaustão para o pré-aquecimento do ar de combustão, o que contribui para a diminuição da quantidade de lenha consumida.

O baixo nível tecnológico do Araripe levou ao desenvolvimento e utilização de fornos onde o consumo energético é, normalmente, bastante superior ao necessário. Como consequência, o forno marmita rotativo utilizado no Polo apresenta eficiência média de apenas 14% (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2008). Em alguns casos específicos, onde há utilização dos avanços citados mais acima, os equipamentos alcançam 45% de eficiência (SINDUSGESSO, 2014). A Tabela 1 apresenta alguns projetos relacionados com medidas de eficiência energética para o processo produtivo do PGA, analisados em um estudo do Banco Interamericano de Desenvolvimento (HENRIQUES JR, 2013).

Projeto	Redução do consumo de lenha	Investimento [R\$]	Vida útil [anos]	Retorno do Investimento [meses]
Instalação de picador de lenha	15,0%	90.000,00	20	7,3
Instalação de sistema de controle da calcinação	3,0%	20.000,00	20	9,5
Instalação de sistema de recuperação de calor	5,0%	25.000,00	15	6,1
Isolamento térmico das paredes da câmara de combustão	5,0%	36.000,00	15	8,8

Tabela 1 – Projetos de eficiência energética para o PGA.

Por fim, a Figura 2 apresenta um fluxograma do processo produtivo empregado no PGA.



Figura 2 – Fluxograma de produção de gesso no PGA.

3 | ASPECTOS DE INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO SOLAR À PRODUÇÃO DE GESSO

3.1 Pontos de Integração e temperatura de fornecimento de calor

Um ponto de integração determina uma demanda de energia térmica dentro da rede de geração e distribuição de calor do complexo produtivo, caracterizado pela especificação de um perfil de consumo.

Na produção de gesso, o único ponto de integração é o sistema de grelhas da câmara de combustão, onde ocorre a queima da lenha. As empresas do Araripe não realizam medições sobre as condições de combustão nos fornos, de forma que a temperatura alcançada pela chama é desconhecida. Apenas, em alguns poucos casos, ocorre a medição dos gases quentes na saída do sistema de exaustão, que, logicamente, indica uma temperatura menor que a alcançada na combustão.

Por não utilizarem sistemas de recuperação de calor para o pré-aquecimento do ar de combustão, essa temperatura ainda é alta, de cerca de 600 °C, conforme pôde ser visualizado nos sistemas supervisórios durante visitas as empresas de calcinação.

3.2 Perfil de demanda térmica

A evolução temporal da carga térmica consumida no processo de calcinação pode ser determinada a partir do acompanhamento do consumo de lenha. Entretanto, a alimentação manual de toras dificulta essa abordagem.

Assim, outra abordagem foi utilizada, em que foi considerada uma carga térmica média constante, determinada a partir do volume de produção e da eficiência dos equipamentos de calcinação; com uma evolução temporal baseada no perfil anual de operação.

Com relação à operação, a produção de gesso não possui sazonalidade diária,

semanal ou anual. Os baixos índices pluviométricos da região favorecem à exploração mineral e à produção contínuas, interrompidas apenas por pequenas paradas de manutenção (PROJETEC, 2010). Dessa forma, é bastante razoável a modelagem anual do processo como contínua, sem intermitências temporais.

A carga térmica é uma função direta da capacidade de produção do forno: quanto maior o volume de produção, maior a quantidade de energia que deve ser fornecida. Portanto, a carga térmica foi estimada a partir da capacidade de produção média das empresas, da energia teórica de calcinação e da eficiência do forno, conforme aponta a Tabela 2. Optou-se por utilizar o melhor caso de eficiência térmica da região, de forma a tomar um cenário otimista. Neste sentido, o perfil de demanda térmica consiste em uma carga térmica constante, contínua ao longo do período anual de análise.

Total de empresas*	Produção Mensal [ton]*	Produção média [ton/h]**	Energia Teórica [kJ/kg]***	Eficiência Térmica	Carga Térmica [kW]	Energia Anual Consumida [GJ]	Custo da energia térmica [R\$/GJ]†
140	375.000	3,72	597,20	45,0%	1.371,44	43.249,60	33,49

Tabela 2 – Dados das empresas produtoras de gesso e estimativa da carga térmica a ser atendida.

* (HENRIQUES JR, 2013); **mês: 30 dias de 24 horas; *** (KUNTZE, 2009);

† baseado em R\$ 20,00 por tonelada de gesso (SINDUSGESSO, 2014).

3.3 Condições de transferência da energia térmica ao processo e conceitos de integração

Como mencionado anteriormente, a energia térmica é fornecida pela troca térmica dos gases quentes com a superfície do cilindro metálico, em condições de temperatura superiores a 600 °C. Após a troca, esses gases são, então, expelidos para a atmosfera, caracterizando um sistema aberto para essa fase gasosa.

Nesta situação, a geração e transporte de calor ocorrem localmente, junto com a transferência de calor ao processo; não há uma rede de distribuição de calor e, por isso, não há distinção entre as operações no âmbito do processo e no âmbito da geração e transporte, impossibilitando a utilização dos conceitos propostos pela literatura para a integração entre os sistemas (HELMKE; HEß, 2015; SCHMITT, 2015b).

3.4 Estratégia de integração e modelagem do processo de calcinação

Diante do exposto, duas barreiras são evidentes. Primeiro, a temperatura de fornecimento de calor, mesmo considerando os 600 °C na saída do sistema de

exaustão está muito além do limite alcançado pelas atuais tecnologias de coletores solar disponíveis comercialmente, de até 400 °C (HORTA, 2016). Em segundo, a simultaneidade espacial entre a geração, transporte e fornecimento do calor necessário ao processo de calcinação travam as possibilidades de integração ao processo produtivo utilizado no Polo Gesseiro do Araripe.

A partir desse impasse, e da necessidade de avaliar o sistema de geração solar como uma alternativa de investimento industrial, cujo objetivo é a redução do consumo de lenha, tornou-se necessário considerar uma situação hipotética, em que essas barreiras possam ser superadas, ou seja, com uma temperatura de fornecimento de calor dentro dos limites alcançados pelas tecnologias comerciais de coletores solar; e onde as operações e geração, transporte e fornecimento de calor sejam separadas, permitindo a consideração de conceitos de integração.

Para este fim, foi considerada a estratégia de integração mais simples e favorável para geração solar, ou seja, quando esta atua como um pré-aquecedor em série com um sistema convencional de geração de calor e com o processo industrial, sem armazenamento térmico, conforme apresentado na Figura 3.

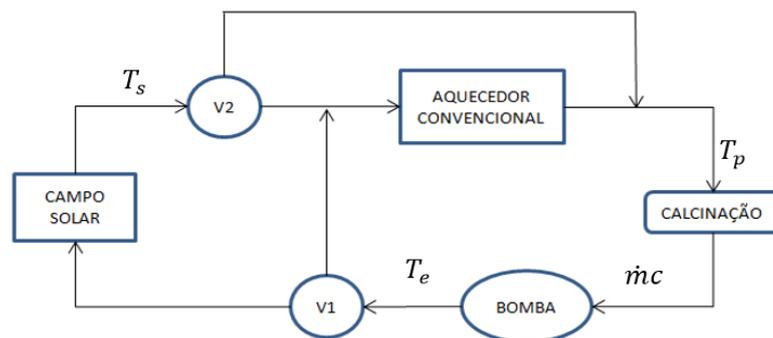


Figura 3 – Configuração de integração proposta.

Nesta situação, a calcinação é um processo hipotético, de aquecimento indireto, como o forno rotativo de casco duplo proposto por Urbano (2013), onde a energia térmica necessária é retirada de um fluido líquido com temperatura T_p . A temperatura desse fluido na saída da calcinação, ou seja, na entrada do campo solar é T_e , de forma que a queda na temperatura do fluido seja capaz de fornecer carga térmica necessária à calcinação. Esse fluido escoar forçadamente pelo sistema com uma taxa de capacidade calorífica $\dot{m}c$ constante, de acordo com a Eq. (1):

$$\dot{m}c = \frac{L}{(T_p - T_e)} \quad (1)$$

em que L é a carga térmica, definida na Tabela 2. Como consequência, a temperatura de saída do campo solar, T_s , é variável. O ganho energético adicional,

necessário para que o fluido alcance T_p é dado pelo sistema de aquecimento convencional. Nesta modelagem de integração, entende-se o sistema de aquecimento convencional utilizando lenha em toras como combustível; ainda, é considerado como ideal, sem perdas, uma vez que as ineficiências do processo produtivo do Araripe foram representadas na determinação da carga térmica na Tabela 2 e, por isso, já estão incluídas no processo de calcinação hipotético.

A válvula V1 direciona o fluido para o sistema de aquecimento convencional, sem passar pelo campo solar, em momentos que a radiação incidente é insuficiente para a produção de energia útil. Já a válvula V2 direciona o fluido para o processo, sem passar pelo sistema de aquecimento convencional, quando a energia útil gerada pelo campo solar é suficiente para que a temperatura de saída do campo seja igual a T_p .

4 | ANÁLISE TERMOECONÔMICA

4.1 Tecnologias de conversão e temperaturas de processo

Para que seja possível ocorrer o processo calcinação, a gipsita deve alcançar, no mínimo, uma temperatura de 130 °C. Entretanto, a transferência de calor do fluido para o processo ocorre apenas quando T_p é superior a esse valor.

Dentre as alternativas comerciais de conversão da radiação solar em energia térmica, os chamados coletores, e indicadas para a aplicação em calor de processo, apenas as tecnologias de concentração linear, como o coletor parabólico linear e o coletor linear Fresnel, conseguem alcançar temperaturas acima dos 130 °C (HORTA, 2016). Nesse nicho, duas faixas de temperatura de trabalho foram identificadas: média, de até 250 °C; e alta, de até 400 °C.

A partir desses níveis de temperatura, duas situações de temperatura para o hipotético processo de calcinação foram consideradas, conforme apresenta a Tabela 3.

Temperatura de Trabalho	Carga Térmica [kW]	T_p [°C]	T_e [°C]	$\dot{m}c$ [kW/K]
Média	1.371,44	200,00	150,00	27,43
Alta	1.371,44	350,00	300,00	27,43

Tabela 3 – Dados do processo de calcinação hipotético considerado.

Nessas situações, alguns coletores comerciais foram identificados na literatura (HORTA, 2016, 2017; SILVA *et al.*, 2014). Optou-se por considerar valores médios para os coeficientes do modelo quadrático de eficiência instantânea e para o custo específico, conforme apresentado na Tabela 4.

Temperatura de Trabalho	η_0	a_1 [W/ m ² K]	a_2 [W/ m ² K ²]	Custo [€/m ²]
Média (até 250 °C)	0,6870	0,4428	0,0023	370,00
Alta (até 400 °C)	0,6960	0,0228	0,0002	600,00

Tabela 4 – Dados dos coletores comerciais considerados.

4.2 Modelagem e dimensionamento do campo solar

O sistema de geração solar foi modelado sem considerar as questões relativas às configurações em série e paralelo dos coletores, mas compreendendo o campo solar como um todo, e representando-o pela área total de abertura dos coletores, A_{ab} [m²]. Assim, as perdas térmicas em tubulações não absorvedoras são desconsideradas.

Ainda, utilizou-se o modelo estático de primeira ordem de eficiência instantânea para modelar o desempenho do campo solar, conforme apresentado na Eq. (2) (RABL, 1985):

$$\eta = F_R \left[\eta_o - \frac{U \cdot (T_e - T_{amb})}{I} \right] \quad (2)$$

Na Eq. (2), η_o representa a eficiência óptica; U é o coeficiente global de perdas térmicas, em kW/K; T_e é a temperatura de entrada do fluido no campo solar, em °C; T_{amb} é a temperatura ambiente, em °C; I é a radiação incidente; e F_R é um fator de transferência de calor, representado pela Eq. (3):

$$F_R = \left\{ \frac{\dot{m}c}{A_{ab}U_{eq}} \left[1 - \exp\left(\frac{-A_{ab}U_{eq}}{\dot{m}c}\right) \right] \right\} \quad (3)$$

Como consequência, a potência útil instantânea gerada pelo sistema de geração solar é dada pela Eq. (4):

$$P = \eta A_{ab} I \quad (4)$$

4.3 Critério de dimensionamento do campo solar

A área de abertura do campo solar foi determinada considerando que no instante de máxima radiação incidente a potência fornecida é igual a carga térmica necessária, L , de acordo com a Eq. (5), em que $I_{máx}$ é a radiação máxima incidente no campo solar e I_x é o limiar de radiação, Eq. (6), ambos em kW/m².

$$A_{ab} = - \left(\frac{\dot{m}c}{U} \right) \cdot \ln \left[1 - \frac{L \cdot U}{\eta_o \dot{m}c \cdot (I_{máx} - I_x)} \right] \quad (5)$$

4.4 Ganhos energéticos anuais

A partir do conceito de limiar de radiação, I_x [kW/m²], um valor no qual a eficiência instantânea é nula e sob o qual não há produção de energia útil, conforme Eq. (6),

os ganhos energéticos anuais, Q [GJ], foram determinados partir de correlações polinomiais quadráticas para a energia anual coletável, $q(I_x)$ [GJ/m²].

$$I_x = \frac{U \cdot (T_e - T_{amb})}{\eta_o} \quad (6)$$

em que \bar{T}_{amb} representa a média anual de temperatura, em °C. Para coletores de concentração linear, com seguimento solar na direção leste-oeste, a correlação tem a forma da Eq. (7) (RABL, 1981; REDDY, 2007):

$$q(I_x) = q_0 + q_1 I_x + q_2 I_x^2 \quad (7)$$

em que os coeficientes q_0 , q_1 e q_2 são apenas funções da média anual de radiação direta, \bar{I}_b [kW/m²], obedecendo as relações apresentadas na Eq. (8) (RABL, 1985):

$$\begin{aligned} q_0 &= -0,098 + 11,944\bar{I}_b - 0,657\bar{I}_b^2 \\ q_1 &= -0,599 - 30,363\bar{I}_b + 17,788\bar{I}_b^2 \\ q_2 &= 1,093 + 17,606\bar{I}_b - 17,290\bar{I}_b^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Neste sentido a energia anual entregue pelo campo solar, em GJ, é definida de acordo com a Eq. (9) (RABL, 1985):

$$Q = A_{ab}\eta_o F_R q(I_x) \quad (9)$$

4.5 Condições de análise

Com relação aos dados técnicos apresentados na Tabela 4, há uma necessidade de linearização do modelo quadrático para a obtenção da eficiência óptica e do coeficiente global de perdas térmicas do modelo linear da Eq. (2). Esta linearização foi realizada em torno das respectivas temperaturas de entrada no campo solar, T_e , tendo como resultado os dados apresentados na Tabela 5. Foi considerada uma taxa de câmbio de R\$ 4,00/€ para a composição do custo específico dos coletores, sem levar em conta os impostos de importação.

Temperatura de Trabalho	η_o	U [W/m ² K]	Custo [R\$/m ²]
Média (até 250 °C)	0,7335	1,0224	1.480,00
Alta (até 400 °C)	0,7154	0,1332	2.400,00

Tabela 5 – Dados técnico dos coletores considerados para os cálculos.

Os dados meteorológicos considerados na análise são apresentados na Tabela

6.

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Média anual de radiação direta*	\bar{I}_b	0,822	kW/m ²
Média anual de temperatura ambiente	\bar{T}_{amb}	24	°C
Radiação direta máxima**	$I_{máx}$	1,00	kW/m ²

Tabela 6 – Dados meteorológicos considerados para os cálculos.

* 5,5 kWh/m²-dia (PEREIRA *et al.*, 2017) para 7 horas de insolação diária (TIBA; FRAIDENRAICH, 2000). ** (MULLER; RAU; SCHRUFER, 2014).

5 | RESULTADOS

5.1 Integração ao processo industrial

A uniformidade de processo produtivo utilizado nas empresas do Polo Gesseiro do Araripe (PGA) permitiu a análise de todo o setor por um único estudo de caso. Na cadeia produtiva, apenas o processo de calcinação, que ocorre no forno marmitta rotativo de queima indireta, consome energia térmica.

Observou-se que a único ponto de integração é o sistema de grelhas da fornalha, onde ocorre a combustão da lenha para a produção da energia térmica necessária à produção de gesso.

A falta de medições sobre as condições reais de combustão não permitiu a determinação da temperatura de fornecimento de calor. Entretanto, medições da temperatura dos gases de combustão na saída do sistema de exaustão indicam 600 °C.

A alimentação manual de lenha na forma de toras impossibilita a determinação da evolução temporal do consumo de lenha. Assim, o perfil de demanda térmica foi determinado por outra abordagem, tomando como base uma carga térmica constante e contínua ao longo do ano, e calculada de acordo com o volume de produção médio das 140 empresas produtoras de gesso.

Por fim, verificou-se que a alta temperatura de fornecimento de calor, maior que 600 °C; e a simultaneidade espacial e temporal da geração, transporte e transferência de energia térmica necessária à calcinação, sem a distinção entre as operações de processo e de geração e distribuição de calor, são os dois fatores que impossibilitam a integração entre o sistema de geração solar e o processo produtivo.

5.2 Análise termoeconômica

A partir da estratégia de integração considerada para o hipotético processo de

calcinação detalhado na Seção 3.4, foi possível analisar o sistema de geração solar como um investimento industrial. Dadas as impossibilidades de integração, optou-se por uma abordagem simples para a determinação dos ganhos energéticos do campo solar e sua avaliação como uma alternativa de investimento industrial, cujo objetivo é a redução do consumo de lenha.

De acordo com o critério de dimensionamento definido na Eq. (5), e considerando os dados da Tabela 3 e da Tabela 5, as áreas de abertura do campo solar para as duas condições hipotéticas de calcinação, em m², seguem conforme apresenta a Tabela 7. No âmbito econômico, o custo do investimento solar foi calculado a partir de um valor médio específico, apresentado na Tabela 5. Os respectivos valores dos custos são apresentados na Tabela 7.

	Área de Abertura [m ²]	Custo Investimento	Ganho energético anual [GJ]	Fração Solar
Média Temp.	2.369,87	R\$ 3.507.400,71	11.060,62	26,00%
Alta Temp.	2.030,90	R\$ 4.874.162,00	11.859,11	27,00%

Tabela 7 - Área de abertura e custo do investimento para as duas classes de coletores.

Com as áreas de abertura definidas, os respectivos ganhos energéticos anuais, definidos pela Eq. (9), são apresentados na Tabela 7. Esses ganhos energéticos constituem uma fração da energia anual consumida pelo processo de calcinação, representando uma redução do consumo de lenha. Tal conceito é definido como a fração solar, cujos valores são apresentados na Tabela 7.

O sistema de geração solar não produz uma receita direta, mas a gera indiretamente por uma redução no consumo de lenha. Numa definição simples, utilizada para caracterizar os investimentos da Tabela 1, o tempo de retorno do investimento é definido como a razão entre o custo do investimento e sua receita anual gerada; nesse sentido, para as duas condições de campo solar consideradas, o tempo de retorno é apresentado na Figura 4.

As diferenças observadas na área de abertura, de cerca de 300 m², justificam-se no menor coeficiente de perdas térmicas para a condição de alta temperatura. No entanto, essas diferenças se equilibram no desempenho anual e os ganhos energéticos anuais são bastante próximos, evidenciados ainda mais pela quase igualdade na fração solar.

No entanto, os custos do investimento, apresentam uma significativa diferença, que pode ser mais bem visualizada no tempo de retorno dos investimentos. O alto custo específico do campo solar na condição de alta temperatura provoca um custo de investimento que, devido a pequena diferença nos ganhos energéticos, não consegue trazer um retorno em um tempo mais curto que a condição de campo de média temperatura. Portanto, a condição de média temperatura se apresenta como a

melhor alternativa.

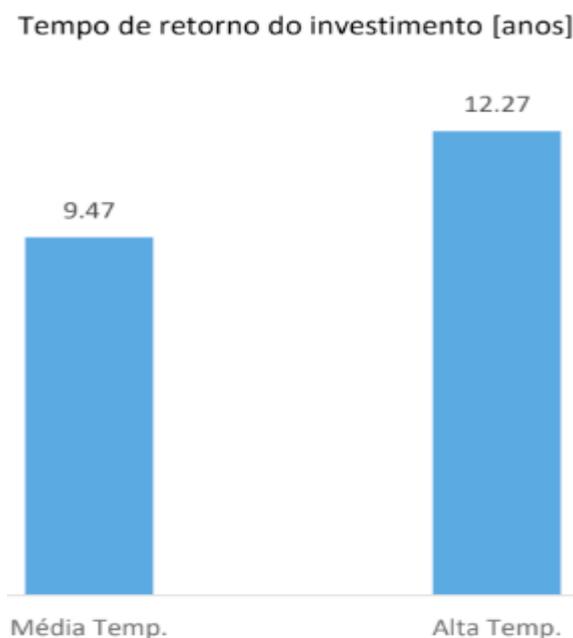


Figura 4 – Tempo de retorno do investimento para as condições de campo solar consideradas.

No entanto, é importante destacar que com uma redução no consumo de lenha de 26%, um investimento de R\$ 3,5 milhões e um tempo de retorno de mais de 9 (nove) anos, o investimento solar não apresenta uma boa atratividade.

De acordo com a Tabela 1, onde são listadas algumas oportunidades de eficiência energética que contribuem na redução do consumo de lenha, essas medidas possuem um tempo de retorno de apenas poucos meses. Ainda, com apenas 4,8% do investimento solar (R\$ 171.000,00), é possível implantar todas as medidas listadas na Tabela 1, que resultariam em uma redução do consumo de lenha de 28%, contribuindo mais para a redução do consumo de lenha e com um dispêndio financeiro significativamente menor.

6 | CONCLUSÕES

O atual processo de produção de gesso beta no Polo Gesseiro do Araripe (PGA) não permite a integração do sistema de geração solar ao processo produtivo. A incompatibilidade de integração observada, evidenciada principalmente na temperatura de fornecimento de calor, traz à luz a necessidade de elaboração de pesquisas sobre o desenvolvimento de uma nova concepção do processo de calcinação, de forma a torná-lo compatível com o modo de operação dos sistemas de geração solar de calor de processos industriais.

Esta atual incompatibilidade inviabiliza a utilização do recurso solar como uma solução de curto prazo para a problemática do consumo de lenha nas empresas

calcinadoras do Pólo Gesseiro do Araripe (PGA), uma vez que novas concepções de calcinação, favoráveis às condições do recurso solar, devem passar por todas as etapas de pesquisa e desenvolvimento até serem aceitas no ambiente industrial.

Do lado energético, o investimento solar não apresenta uma boa atratividade. Mesmo com uma análise bastante simplificada, onde os seus ganhos energéticos são superestimados e os custos subestimados, apresenta, na melhor situação, um tempo de retorno de pouco mais de 9 (nove) anos.

Outros investimentos concorrentes na redução do consumo de lenha, como os apresentados na Tabela 1, se apresentam como alternativas mais viáveis, já que possuem simplicidade técnica, custo de investimento e tempo de retorno significativamente mais favoráveis que a proposta solar. De fato, o processo produtivo do Araripe é, em geral, bastante precário, fato caricaturado na baixa eficiência média dos fornos da região, de apenas 14%.

Corroborando as afirmativas citadas acima, recomendações da Agência Internacional de Energia indicam que a utilização da geração solar em um processo produtivo deve ser encarada como a inserção de uma nova fonte de geração de calor e, assim, sua utilização deve ser considerada apenas quando não há mais possibilidade de ações de eficiência energética e de aproveitamento de calor residual.

Complementando o já exposto, é importante enfatizar a realidade local do PGA. Distante cerca de 700 km das principais áreas metropolitanas da região Nordeste, o Pólo não possui disponibilidade de mão de obra qualificada, principalmente no que concerne à manutenção de novas tecnologias, como a solar.

7 | REFERÊNCIAS

ANDRADE, C. A. L.; FARIAS, C. J. L.; MOUTINHO, L. M. G. **O arranjo produtivo local do gesso do Araripe e a sua relação com a Ferrovia Transnordestina**, Parnaíba – Piauí, VII SOBER Nordeste, 2013.

CAMPELLO, F. C. B. **O consumo específico de lenha como índice técnico para o ordenamento florestal no Araripe em Pernambuco**, Revista dos Mestrados Profissionais, vol. 2, n. 1, pp. 23–43, 2013.

HASSINE, I. B. Identification of Suitable Integration Points, In: Muster, B. (Org.). **Solar Process Heat for Production and Advanced Applications: Integration Guideline**, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable B2, pp. 77–85, 2015.

HELMKE, A., HEß, S. Classification of Solar Process Heat System Concepts, In: Muster, B. (Org.). **Solar Process Heat for Production and Advanced Applications: Integration Guideline**, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable B2, pp. 61–76, 2015.

HENRIQUES JR, M. F. **Potencial de financiamento de eficiência energética nos setores de cerâmica e gesso no Nordeste**, Banco Interamericano de Desenvolvimento, 2013.

HORTA, P. **Process heat collectors: state of the art and available medium temperature**

collectors, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable A1.3, 2016

_____. Comunicação pessoal, 2017.

KUNTZE, R. A. **Gypsum: Connecting Science and Technology**, American Society for Testing Materials - ASTM International, 2009.

MÜLLER, C.; RAU, C.; SCHRÜFER, J. **CSP in non-electrical applications**, Projeto Energia Heliotérmica, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Brasília, 2014.

MURPHY, P. **Guidelines Developed for Process Heat Integration**, International Energy Agency, Solar Heat & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, 2015.

MUSTER, B.; *et al.* **Integration Guideline**, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable B2, 2015.

_____. (Org.). Definitions and Nomenclatures, **Solar Process Heat for Production and Advanced Applications: Integration Guideline**, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heating Integration in Industrial Processes, Deliverable B2, pp. 4–7, 2015.

_____.; SCHMITT, B.; SCHNITZE, H. Thermal Processes and Heat Distribution Networks in Industry. In: MUSTER, B. (Org.). **Solar Process Heat for Production and Advanced Applications: Integration Guideline**, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable B2, pp. 11–30, 2015.

PEREIRA, E. B.; *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2017.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. **Gesso: Produção e utilização na construção civil**, Sebrae, Recife, 2008.

PLATZER, W. **Performance assessment methodology and simulation case studies**, International Energy Agency, Solar Heat & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable C3, 2016.

PROJETEC. **Estudo de viabilidade técnicoeconômica do processo de produção e logística do gesso fabricado a partir da gipsita do Araripe Pernambuco**, Relatório Final, 2010.

RABL, A. **Yearly average performance of the principal solar collector types**, Solar Energy, vol. 27, n. 3, pp. 215–233, 1981.

_____. **Active Solar Collectors and Their Applications**, Oxford University Press, 1985.

REDDY, T. A. Active Solar Heating Systems. In: KREITH, F.; GOSWAMI, D. Y. (Org.). **Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy**, CRC Press, pp. 916–964, 2007.

ROLIM, M. M.; FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. C. **Energia solar na produção de gesso – renovando definições**, IV Congresso Brasileiro de Energia Solar, V Conferência Latino-Americana da ISES, São Paulo, 2012.

SCHMITT, B. Assessment Methodology for Solar Heat Integration. In: MUSTER, B. (Org.). **Solar Process Heat for Production and Advanced Applications: Integration Guideline**, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, Deliverable B2, pp. 31–33, 2015a.

_____. Classification of Integration Concepts. In: MUSTER, B. (Org.). **Solar Process Heat for Production and Advanced Applications: Integration Guideline**, International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, task 49: Solar Heat Integration in Industrial Processes, pp. 46–60, 2015b.

SILVA, J. A. A. **Potencialidades de florestas energéticas de Eucalyptus no pólo gesseiro do Araripe-PE**, Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica, vol. 5 e 6, pp. 301–319, 2009.

SILVA, R.; *et al.* **Thermo-economic design optimization of parabolic trough solar plants for industrial process heat applications with memetic algorithms**, Applied Energy, vol. 113, pp. 603–614, 2014.

SINDUSGESSO. **Potencialidades do Pólo Gesseiro do Araripe, Simpósio Pólo Gesseiro do Araripe: Potencialidades, Problemas e Soluções**, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2014.

TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N. **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres**, Editora Universitária da UFPE, 2000.

URBANO, J. J. **Estudo numérico do processo de calcinação da gipsita em fornos rotativos com aquecimento indireto a óleo**, Tese (Doutorado), Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

SOBRE O ORGANIZADOR:

Paulo Jayme Pereira Abdala possui graduação em Engenharia Eletrônica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - RJ (1988), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2005) e pós-graduação em Gestão de Aviação Civil pela Universidade de Brasília (2003). Entre 1989 e 2008 foi Chefe do Laboratório de Ruído Aeronáutico e Emissões de Motores do DAC/ANAC, tendo desenvolvido centenas de estudos sobre poluição sonora e atmosférica oriundas da atividade aeronáutica. Foi representante oficial do Brasil em diversos Fóruns Internacionais sobre meio ambiente promovidos pela Organização de Aviação Civil Internacional OACI - Agência da ONU. Foi Coordenador dos Cursos de Engenharia de Produção, Elétrica, Civil e Mecânica na UNOPAR/PG entre 2013 e 2018. Atualmente é Consultor Independente para a AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, OACI e INFRAERO. Tem experiência na área de Engenharia Eletrônica, atuando principalmente nos seguintes temas: acústica, meio ambiente e pedagogia (metodologia TRAINAIR/OACI).

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-066-7

