

ENERGIA: UM OLHAR SOBRE SEUS DIFERENTES TIPOS



VOLUME II



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Frederico Celestino Barbosa

Energia: um olhar sobre seus diferentes tipos

2ª ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

2ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Frederico Celestino
B238E Energia: um olhar sobre seus diferentes tipos

/ Frederico Celestino Barbosa. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2022

98 f.: il

DOI: 10.37423/2022.edcl460

ISBN: 978-65-5367-094-5

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. energia-mecânica 2. energia-térmica 3. energia-elétrica 4. energia-química 5. energia-atômica I.
Barbosa, Frederico Celestino II. Título

CDU: 333.7

<https://doi.org/10.37423/2022.edcl460>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

Dr. João Luís Ribeiro Ulhôa

Dra. Eyde Cristianne Saraiva-Bonatto

MSc. Frederico Celestino Barbosa

MSc. Carlos Eduardo de Oliveira Gontijo

MSc. Plínio Ferreira Pires

Editora Conhecimento Livre

Piracanjuba-GO

2022

CAPÍTULO 1	5
INSIGHT ON THE AUTOTHERMAL REFORMING PERFORMANCE INSIDE A FLUIDIZED BED REFORMER ON THE SOLID OPEN-CELL FOAMS: A MODELLING AND SIMULATION ANALYSIS	
Jornandes Dias da Silva	
DOI 10.37423/220305525	
CAPÍTULO 2	16
TECHNOLOGY OF THE STEAM REFORMING OF CO ₂ FOR THE SOLAR-DRIVEN THERMOCHEMICAL REACTOR ASSESSMENT: MODELLING AND COMPUTER SIMULATION	
Jornandes Dias da Silva	
DOI 10.37423/220305526	
CAPÍTULO 3	30
AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE CARBONIZAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL APLICADA À INDÚSTRIA SIDERÚRGICA	
Antão Rodrigo Valentim	
DOI 10.37423/220305563	
CAPÍTULO 4	52
USINAGEM NÃO TRADICIONAL: JATO ABRASIVO	
Julia Pereira Manenti	
Maxsuel Cruz Teixeira	
Leonardo Thofehrn Sarkis	
Paulo Roberto Hoffmann	
DOI 10.37423/220305574	
CAPÍTULO 5	61
A INTEGRAÇÃO DE COR E LUZ NA ARQUITETURA AMBIENTAL, UMA QUESTÃO DE SUSTENTABILIDADE	
Maria da Purificação Teixeira	
Paulo Cirrota	
DOI 10.37423/220305587	
CAPÍTULO 6	80
PROJETO BÔNUS FOTOVOLTAICO: ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA DAS UNIDADES PROSSUMIDORAS CONTEMPLADAS	
Andrigo Filippo Antonioli	
Helena Flávia Napolini	
João Pedro Frederico de Abreu	
Clarissa Debiazi Zomer	
Ana Ligia Papst de Abreu	
Samuel Luna de Abreu	
Ricardo Rüther	
DOI 10.37423/220305635	

Capítulo 1

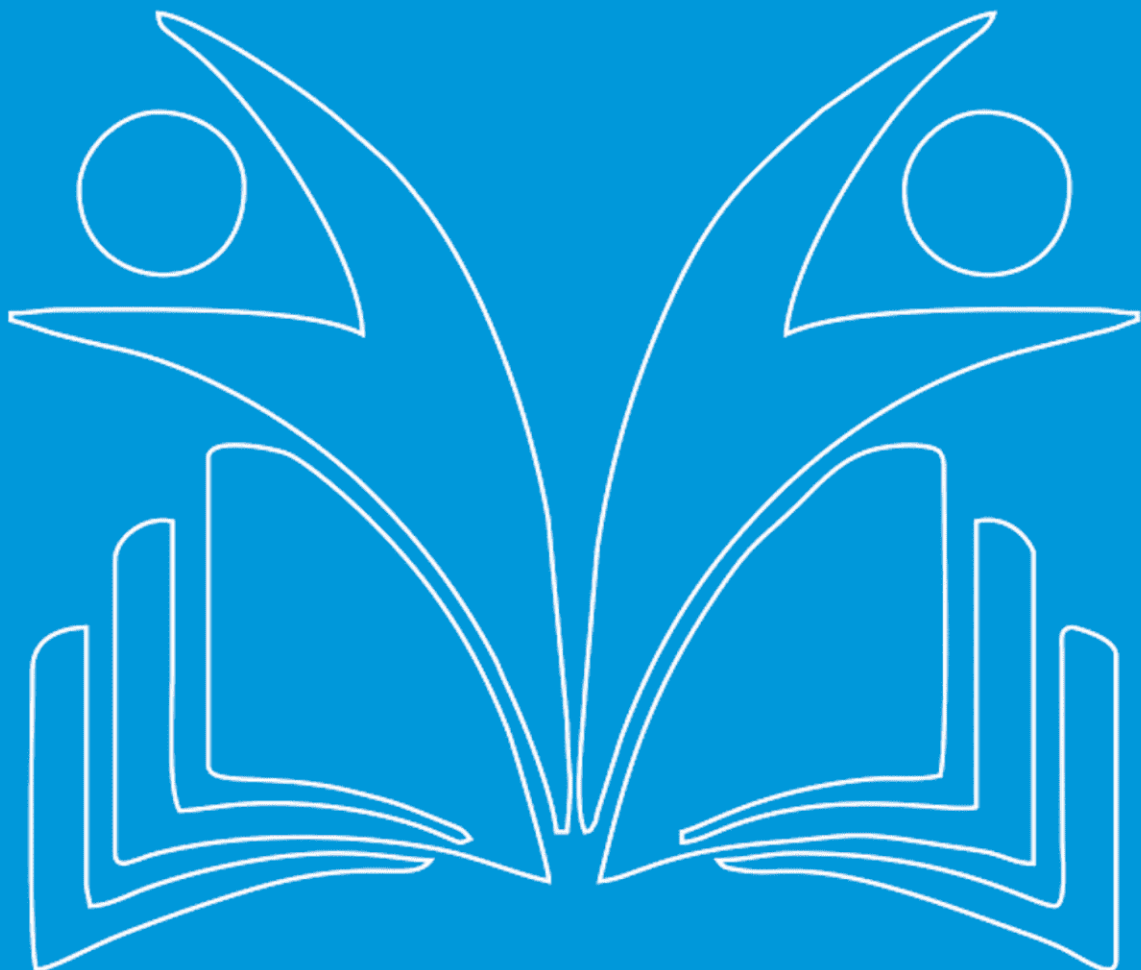


10.37423/220305525

INSIGHT ON THE AUTOTHERMAL REFORMING PERFORMANCE INSIDE A FLUIDIZED BED REFORMER ON THE SOLID OPEN-CELL FOAMS: A MODELLING AND SIMULATION ANALYSIS

Jornandes Dias da Silva

Universidade de Pernambuco - UPE



Abstract: The autothermal reforming (ATR) can be processed on the porous materials bed as solid open-cell foams due to high porosity and great surface area. Solid open-cell foams are macroporous reticulated 3D structures constituted by interconnected cavities and made of metals (aluminum, steel), ceramics (alumina, silicon carbide etc.), or carbon materials. This work has as main objective a theoretical modelling to describe the process variables of the ATR on the TFB reformer. These process variables describe the specific aims as from each equation of the physical-mathematical model characterizing the performance from reformer. When the CH_4/O_2 ratio decreases on the ATR method in TFB reformer, the reaction temperature is notably increased. A rise of the average velocity of the gaseous phase ($u_{g,avg}$) indicates a decrease on the reaction temperature profiles in TFB reformer and thus, a reduction in the heat release by the ATR method. An increase of the operating temperature has a significant role of the thermochemical conversion of CH_4 because of the higher consumption of reactants from ATR's reactions.

Keywords: Autothermal reforming, TFB reformer, Thermochemical conversion, Mathematical model

1. INTRODUCTION

The Catalytic Partial Oxidation of Methane (CPOM) is currently considered a promising process for so-called synthesis gas (H_2 and CO). The synthesis gas (syngas) can be obtained from various fuels among which natural gas is of special importance. The CPOM can be processed on the porous materials bed as solid open-cell foams due to high porosity and great surface area. Solid open-cell foams are macroporous reticulated 3D structures constituted by interconnected cavities and made of metals (aluminum, steel), ceramics (alumina, silicon carbide etc.), or carbon materials. In the field of the catalyst reforming process, solid open-cell foams have been tested for the steam reforming of methane and dry reforming of Methane (Chen et al., 2018; Wang et al., 2015). These researchers had reported results of reforming processes using fixed bed reformers, but these authors didn't provide orientation when these reformers were used to process the CPOM on the solid open-cell foam bed. We fill this gap with the approaches indicated by these authors and extend a novel approach for the CPOM process using a Thermochemical Fluidized Bed (TFB) reformer (Lima et al., 2020; Anjos et al., 2019).

The CPOM's combustion reaction is strongly exothermal and it can be used to convert methane (CH_4) into hydrogen (H_2). The CPOM's method includes the thermochemical conversion of CH_4 after occurring chemical dissociation process (Silva, 2014). As negative effect of the CPOM process, due to the highly exothermic nature of the CPOM reaction, hot-spots with serious consequences are formed in the TFB reformers. Having considered the challenges of the CPOM method, it is also acceptable to look at its potentials for being integrated with other processes (Wu et al., 2020, Cruz and Silva, 2017). With the purpose to reduce the research cost and project time, the mathematical modelling and computer simulation are extensively used to obtain a better understanding of design parameters in reformers. The novelty of the present work lies in the use of open-cell foam (Al_2O_3) bed for the CPOM method. The effects of the CH_4/O_2 ratio and $u_{g,avg}$ on the reaction Temperature are numerically investigated in TFB reformer. In addition, the operating temperature's effect on the TC of CH_4 will be verified for the CPOM method from TFB reformer.

2. THERMOCHEMICAL MODELLING

A schematic setup is used to study the thermochemical conversion of the CPOM method in TFB reformer according to Fig. 1. The physical model from TFB reformer is shown in Fig. 1.

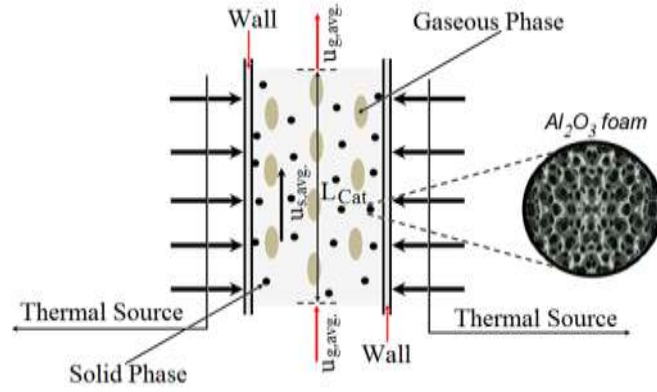
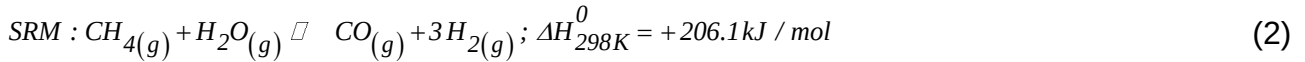
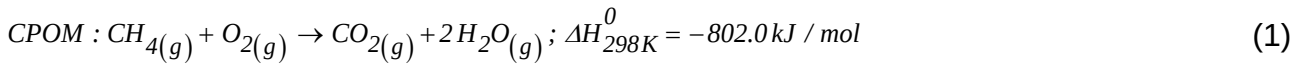


Figure 1: Schematic setup of the physical model from TFB reformer to study the CPOM method

2.1. THERMOCHEMICAL KINETIC MODEL

The CPOM method's main reactions on the catalyst bed contain two reactions including the combustion of CH_4 and SRM (Silva and Abreu, 2016; Ji et al., 2003) as follows:



The above reaction (1) is highly exothermic. On the other hand, the above reaction (2) is highly endothermic. The overall rate equations of reactions are based on the Langmuir-Hinshelwood kinetic model as follows.

$$R_{CPOM} = \frac{k_{1,CPOM} x_{CH_4} x_{O_2}}{\left(1 + K_{CH_4} x_{CH_4} + K_{O_2} x_{O_2}\right)^2} + \frac{k_{2,CPOM} x_{CH_4} x_{O_2}^{1/2}}{\left(1 + K_{CH_4} x_{CH_4} + K_{O_2} x_{O_2}\right)} \quad (3)$$

$$R_{SRM} = \frac{\frac{k_{SRM}}{P_{H_2}^{2.5}} \left(P_{CH_4} P_{H_2O} - \frac{P_{H_2}^3 P_{CO}}{K_{SRM}} \right)}{\left(1 + \frac{F_{H_2O}}{F_{CH_4}} + \frac{F_{H_2}}{F_{CH_4}} + K_{CO} P_{CO} + K_{H_2} P_{H_2} + K_{CH_4} P_{CH_4} + \frac{K_{H_2O} P_{H_2O}}{P_{H_2}} \right)^2} \quad (4)$$

3. MATHEMATICAL MODELLING

A thermochemical modelling is used to model the CPOM method in TFB reformer. Thus, a model is built to study the thermochemical performance inside TFB reformer. This model has been constructed by a system of Nonlinear Partial Differential Equations (NPDEs) that couples to a complex kinetic model of the CPOM reaction. The development of the model takes into account the following assumptions:

(1) the model from TFB reformer is plug-flow with axial dispersion under transient condition, (2) the radial dispersion is negligible inside TFB reformer, (3) the gaseous mixture has constant density in TFB reformer, (4) the deposition effect of carbon at the surface of catalytic particles has been neglected, (5) the gas behavior inside TFB reformer was considered as an ideal gas mixture, (6) the bed porosity in axial direction is considered constant, and (7) chemical reaction is assumed to take place at the surface of catalyst particles. These premises are developed to construct the governing equations of the model inside TFB reformer as follows.

3.1. GAS PHASE'S ENERGY BALANCE

The developed equation provides clear information to drive the temperature distribution on the gas phase in porous medium of the catalyst bed. An one-dimensional dynamic equation is developed for the gas phase's temperature as follows.

$$\rho_{g,mix}.C_{p,g,mix}.\left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + u_{g,avg}.\frac{\partial T_g}{\partial z}\right) = \lambda_{g,eff} \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} - h_{gs} \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b} \frac{6}{d_p} (T_g - T_r) \quad (5)$$

The suitable initial and boundary conditions from Eq. (7) are given as follows.

$$T_g|_{t=0} = T_{g,0}; \frac{\partial T_g}{\partial z} \Big|_{z=0^+} = \frac{\rho_{g,mix}.C_{p,g,mix}.u_{g,avg}}{\lambda_{g,mix}} \left(T_g|_{z=0^+} - T_{g,\infty} \right); \frac{\partial T_g}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0 \quad (6)$$

3.2.SOLID PHASE'S ENERGY BALANCE

The model equation includes the solid phase's convection effect, effective thermal dispersion, the gas-solid heat transfer, and global rate of CPOM reactions. The governing equation for the solid phase is defined as follows.

$$\rho_s C_{p,s} \left(\frac{\partial T_r}{\partial t} + u_{s,avg} \frac{\partial T_r}{\partial z} \right) = \lambda_{s,eff} \frac{\partial^2 T_r}{\partial z^2} + h_{sg} \frac{6}{d_p} \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b} (T_g - T_r) + \rho_s \frac{(1-\varepsilon_p)}{\varepsilon_p} \left[(-\Delta H_{CPOM}) \eta_{CPOM} R_{CPOM} + (+\Delta H_{SRM}) \eta_{SRM} R_{SRM} \right]; 0 \leq z \leq L, t > 0 \quad (7)$$

The initial and boundary conditions from Eq. (7) are described as:

$$T_r|_{t=0} = T_{r,0}; -\frac{\partial T_r}{\partial z} \Big|_{z=0^+} = \frac{\rho_s C_{p,s} u_{s,avg}}{\lambda_s} \left(T_r|_{z=0^+} - T_{r,\infty} \right); \frac{\partial T_r}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0 \quad (8)$$

3.3. TRANSPORT EQUATION OF CHEMICAL COMPONENTS

Based on assumptions mentioned in section 3, chemical components of the CPOM method in TFB reformer are modelled by Eq. (9). Eq. (9) reports the transport equations for chemical components i ($i = \text{CH}_4, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2, \text{CO}, \text{CO}$ and H_2) as follows.

$$\frac{u_{g,avg.}}{g} \frac{\partial F_i}{\partial t} + \frac{u_{g,avg.}}{S_{sp}} \frac{\partial F_i}{\partial z} = \frac{D_{ax,i}}{S_{sp}} \frac{\partial^2 F_i}{\partial z^2} + \rho_s r_{ref}^2 L (1 - \varepsilon_b) r_i; 0 < z < L \quad (9)$$

The suitable initial and boundary conditions from Eq. (9) are presented as follows.

$$F_i|_{t=0} = F_{i,0}; \frac{D_{ax,i}}{L} \frac{\partial F_i}{\partial z} \Big|_{z=0^+} = \frac{u_{g,avg.}}{\varepsilon_b} (F_i|_{z=0^+} - F_{i,\infty}); \frac{D_{ax,i}}{L} \frac{\partial F_i}{\partial z} \Big|_{z=L} = \frac{k_{gs,eff}}{\varepsilon_b} (F_i|_{z=L} - F_{i,\infty}) \quad (10)$$

3.4. NUMERICAL SOLUTION OF THE MODEL EQUATION

The numerical solution of the model has been driven for a numeric method which ensures the numerical stability (Silva and Abreu, 2016). Therefore, the developed model was solved by the finite volume method (FVM) in together with prescribed initial and boundary conditions to analyze the performance of the CPOM method in TFB reformer.

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

A physical-mathematical modelling has been developed to investigate the CPOM method in TFB reformer. A computational algorithm using the FORTRAN 95 has been elaborated by authors to compute the CPOM method's variables in TFB reformer. The Table 1 shows the physical parameters used to feed the computer algorithm follows as.

Table 1: Physical parameters used to feed the computer algorithm

parameters	Values	Sources
$K_1, \text{CPOM (mol/kg}_{\text{cat.}} \text{ sec.)}$	3.14×10^{-4}	Ji et al., 2003
$K_2, \text{CPOM (mol/kg}_{\text{cat.}} \text{ sec.)}$	2.64×10^{-4}	Ji et al., 2003
$K_{\text{CH}_4, 0} (-)$	6.67×10^{-2}	Ji et al., 2003
$K_{\text{O}_2, 0} (-)$	4.34×10^{-5}	Ji et al., 2003
$k_{\text{SRM}} [\text{mol (kPa)}^{0.5}/\text{kg}_{\text{cat.}} \text{ sec.}]^{(1)}$	7.39×10^{13}	Ji et al., 2003
$K_{\text{eq}, 1} (\text{kPa}^2)^{(1)}$	2.13×10^7	Ji et al., 2003
$K_{\text{CH}_4} (\text{kPa}^{-1})^{(1)}$	9.87×10^{-7}	Ji et al., 2003
$K_{\text{H}_2\text{O}} (-)^{(1)}$	2.61×10^4	Ji et al., 2003

K_{H_2} (kPa ⁻¹) ⁽¹⁾	5.48×10^{-12}	Ji et al., 2003
K_{CO} (kPa ⁻¹) ⁽¹⁾	7.43×10^{-6}	Ji et al., 2003
$\eta_{CPOM}^{(1)}$ (-)	0.037	Cruz and Silva, 2017
$\eta_{SRM}^{(1)}$ (-)	0.015	Cruz and Silva, 2017
X_{O_2}	0.032	Silva and Abreu, 2016
X_{CH_4}	0.071	Silva and Abreu, 2016
L (m)	0.18	Estimated

Table 1: Physical parameters used to feed the computer algorithm (continued)

parameters	Values	Sources
d_p (m)	7.9×10^{-5}	Estimated
$d_{reformer}$ (m)	4.2×10^{-3}	Estimated
$T_{g,0}$ (K)	873	Estimated
$T_{r,0}$ (K)	873	Estimated
$P_{op.}$ (kPa)	500	Estimated
$\rho_{g, mix.}$ (kg/m ³)	0.1692	Silva and Abreu, 2016
$C_{p, g, mix.}$ (kJ/kg K)	121.67	Dias and Silva, 2020
$u_{g, mix}$ (m/sec.)	0.131	Dias and Silva, 2020
$\lambda_{g, eff.}$ (W/m K)	147.13	Dias and Silva, 2020
H_{gs} (W/m ² K)	0.037	Dias and Silva, 2020
ε_b (m ³ gas/m ³ reformer)	0.39	Dias and Silva, 2020
ρ_s (kg/m ³)	590	Voltolina et al., 2017
$C_{p, s.}$ (kJ/kg K)	1.214	Dias and Silva, 2020
$u_{s, mix}$ (m/sec.)	0.017	Dias and Silva, 2020
$\lambda_{s, eff.}$ (W/m K)	126.31	Dias and Silva, 2020
ε_p (m ³ gas/m ³ reformer)	0.88	Voltolina et al., 2017
g (m/sec.)	3.53×10^4	Silva and Abreu, 2016
S_{sp} (sec. ⁻¹)	2.21×10^{-4}	Silva and Abreu, 2016
D_{ax, CH_4} (m ² /sec.)	5.28×10^{-6}	Silva and Abreu, 2016
D_{ax, O_2} (m ² /sec.)	4.97×10^{-5}	Silva and Abreu, 2016
D_{ax, H_2O} (m ² /sec.)	2.98×10^{-6}	Silva and Abreu, 2016
D_{ax, H_2} (m ² /sec.)	1.21×10^{-6}	Silva and Abreu, 2016

$D_{ax, CO}$ (m ² /sec.)	3.17×10^{-6}	Silva and Abreu, 2016
D_{ax, CO_2} (m ² /sec.)	9.87×10^{-6}	Silva and Abreu, 2016

⁽¹⁾ Computed at 700°C

4.1 NUMERICAL EXPERIMENTS OF THE REACTION TEMPERATURE

Fig. (2a) was reported that Reaction Temperature Profiles (RTPs) tend to assume an inflection point of maximum values in which the effective temperature of the CPOM method is optimal. The location (± 0.046) of maximum values could be owing to the interaction of many factors like the composition of the catalyst bed, initial temperature, operating pressure, and the thermodynamic equilibrium of endothermic reaction. As results, when molar ratio ($CH_4/O_2 = 0.25$) at the TFB reformer's inlet is low, the released heat of the CPOM reaction has notably effect on the RTP and thus, the RTP is increased. When molar ratio ($CH_4/O_2 = 0.75$) at the TFB reformer's inlet is higher, the released heat of the CPOM reaction has remarkably effect on the RTP and therefore, the RTP is reduced. After reaching the stable state, the RTPs are maintained constant up to $z/L = 1.0$ from TFB reformer with values of 875.46 K ($CH_4/O_2 = 0.75$), 947.21 K ($CH_4/O_2 = 0.5$), and 998.57 K ($CH_4/O_2 = 0.25$), respectively. As seen Fig. 2a, an inflection point is also verified in Fig. 2b. The location is reported on the RTPs at about ± 0.031 . As results, an increase of the $u_{g,avg}$ indicates a decrease on the RTPs in TFB reformer and therefore, a reduction of the heat rate on the CPOM method. Unlike, a decrease of the $u_{g,avg}$ points an increase on the RTPs in TFB reformer and thus, a rise of the heat rate on the CPOM method. Three different values of the $u_{g,avg}$ were used to check the sensibility of the RTP to $u_{g,avg}$. Fig. 2b reports that when the $u_{g,avg}$ is lower ($u_{g,avg} = 0.005$ m/sec.), the RTP is notably increased. Opposing, when the $u_{g,avg}$ is higher ($u_{g,avg} = 0.500$ m/sec.), the RTP is remarkably reduced. After achieving the stable state ($z/L = \pm 0.40$), RTP s are kept constant up to $z/L = 1.0$ on TFB reformer with values at about 1005.34 K ($u_{g,avg} = 0.5$ m/sec.), 1027.18 K ($u_{g,avg} = 0.05$ m/sec), and 1070.43 K ($u_{g,avg} = 0.005$ m/sec.), respectively.

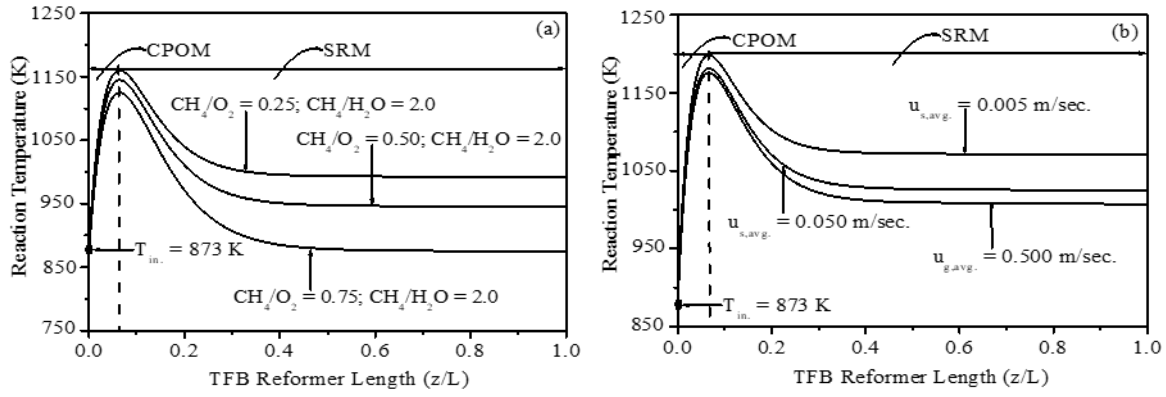


Figure 2: (a) Profiles of the reaction temperature along of the TFB reformer length at different molar ratios of CH_4/O_2 ; (b) Profiles of the reaction temperature along of the TFB reformer length at different average gas velocities.

Fig. 3c investigates the profiles of mole flows for each component i of the CPOM method TFB reformer at the following operating conditions: $CH_4/O_2 = 0.5$, $H_2O/CH_4 = 2.0$, 500 kPa, 973 K, and 0.185 m/sec. In this figure, the mole flow's profiles of the reactants (CH_4 , O_2 , and H_2O) and products (CO , CO_2 and H_2) have been reported for the CPOM method from TFB reformer. H_2O was consumed by the CPOM method in only 42.37% of the TFB reformer length, after that a stable state is reached up to $z/L = 1.0$. On the other hand, CH_4 and O_2 were consumed by the CPOM method in only 78.93% of the TFB reformer length, after that stable states are achieved until $z/L = 1.0$. After reaching 58.32% of the TFB reformer length, H_2 and CO achieve stable states with values of 55.71% and 26.59% at $z/L = 1.0$. On the other hand, after reaching 29.89% of the TFB reformer length, CO_2 arrives a stable state with value of 7.33% at $z/L = 1.0$.

Thermodynamic limitations of Reformers are considered as a great problem to increase the thermochemical conversion of the CPOM method. To solve this gap, it was used the TFB reformer as an innovating use that improves thermodynamic limitations and can perfect the thermochemical conversion of CH_4 as follows.

$$\text{Thermochemical Conversion (TC) of } CH_4 = 1 - \frac{F_{CH_4, out}}{F_{CH_4, in}} \quad (11)$$

Fig. 3d shows the TC of CH_4 of the CPOM method in TFB reformer. It is clearly shown that the TC of CH_4 is increasing with the operating temperature's rise. As results, after achieving the stable state (see Fig. (5)), the TC of CH_4 is kept constant up to $z/L = 1.0$ from TFB reformer with values of 52.67% (573 K), 74.06% (773 K), and 96.53% (973 K), respectively.

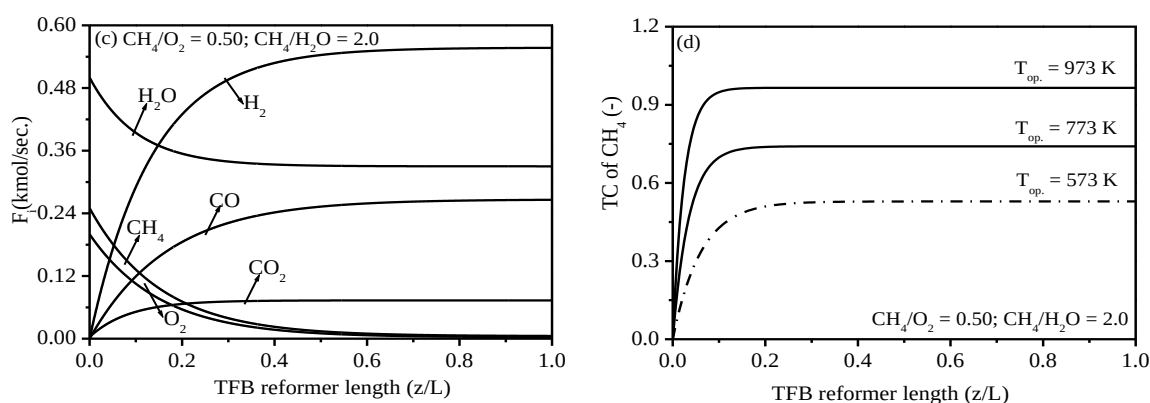


Figure 3: (c) Molar flow profiles of components i along of the TFB reformer length; (d) Effect of the operating temperature on the conversion of CH_4 along of the TFB reformer length.

5 CONCLUSIONS

The present work has been focused towards a numerical analysis of the mathematical modelling and computer simulation to describe the performance of a TFB reformer. The model equations that describe the gas temperature, reactions temperature, molar flow of components i have been reported and discussed. The work's results highlighted the importance of the mathematical model developed to describe the performance from TFB reformer. In this context, main conclusions are summarized as follows.

1. The content of O_2 has an important effect on the reaction temperature, i.e., when the CH_4/O_2 is low, the reaction temperature is notably increased. Unlike, when the CH_4/O_2 ratio is higher, the reaction temperature is remarkably decreased.
2. The effect of the $u_{g,avg}$ has driven a significant role on the reaction temperature profiles. Similarly to the CH_4/O_2 ratio, when the $u_{g,avg}$ is low, the reaction temperature profiles are remarkably increased. Unlike, the reaction temperature profiles is reduced with the increase of the $u_{g,avg}$.
3. The effect of the operating temperature has driven a significant role the TC of CH_4 . An increase of the operating temperature has a significant improvement of the TC of CH_4 due to the higher consumption of reactants from CPOM's reactions.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors of this paper would like to thank CNPq (National Council of Scientific and Technological Development) for the financial support given (Process 48354/2018).

REFERENCES

- Anjos E., Oliveira C., Silva J., 2019, Dynamic Analysis to Produce Hydrogen in a Fixed Bed Catalytic Reactor by the Steam Reforming of Toluene, *Chemical Engineering Transactions*, 74, 553-558.
- Balzarotti, R., Ambrosetti, M., Beretta, A., Groppi, G., Tronconi, E., 2020, Investigation of packed conductive foams as a novel reactor configuration for methane steam reforming, *Chemical Engineering Journal*, 391, 123494.
- Cruz, B. M., Silva, J. D., 2017, A two-dimensional mathematical model for the catalytic steam reforming of methane in both conventional fixed-bed and fixed-bed membrane reformers for the production of hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 23670-23690.
- Clark, R-J., Mehrabadi, A., Farid, M., 2020, State of the art on salt hydrate thermochemical energy storage systems for use in building applications, *Journal of Energy Storage*, 27, 101145.
- Chen, X., Wang, F., Han, Y., Yu, R., Cheng, Z., 2018, Thermochemical storage analysis of the dry reforming of methane in foam solar reactor, *Energy Conversion and Management*, 158, 489-498.
- Dias, V. F., Silva, J. D., 2020, Mathematical modelling of the solar-driven steam reforming of methanol for a solar thermochemical micro-fluidized bed reformer: thermal performance and thermochemical conversion, *Braz. Soc. Mech. Sci Eng.*, 42, 447.
- Dashliborun, A. M., Fatemi, S., Najafabadi, A. T., 2013, Hydrogen production through partial oxidation of methane in a new reactor configuration, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 1901-1909.
- Ji, P., Van der Kooi, H. J., de Swaan Arons, J., 2003, Simulation and thermodynamic analysis of an integrated process with H₂ membrane CPO reactor for pure H₂ production, *Chemical Engineering Science*, 58, 3901-3911.
- Lima, K. P. M., Dias, V. F. and Silva, J. D., 2020, Numerical modelling for the solar driven bi-reforming of methane for the production of syngas in a solar thermochemical micro-packed bed reformer, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 10353-10369.
- Silva J.D., 2014, Dynamic simulation of the steam reforming of methane for the production of hydrogen in a catalytic fixed bed membrane reactor, *Chemical Engineering Transactions*, 39, 961-966.
- Silva, J. D. and Abreu, C. A. M., 2016, Modelling and simulation in conventional fixed-bed and fixed-bed membrane reformers for the steam reforming of methane, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 11669-11674.
- Voltolina, S., Marín, P., Díz, F. V., Salvador, O., 2017, Open-cell foams as beds in multiphase reactors: Residence time distribution and mass transfer". *Chemical Engineering Journal*, 316, 323 - 331.
- Wu, S., Zhou, C., Doroodchi, E., Moghtaderi., 2020, Techno-economic analysis of an integrated liquid air and thermochemical energy storage system, *Energy Conversion of Management*, 205, 112341.

Capítulo 2

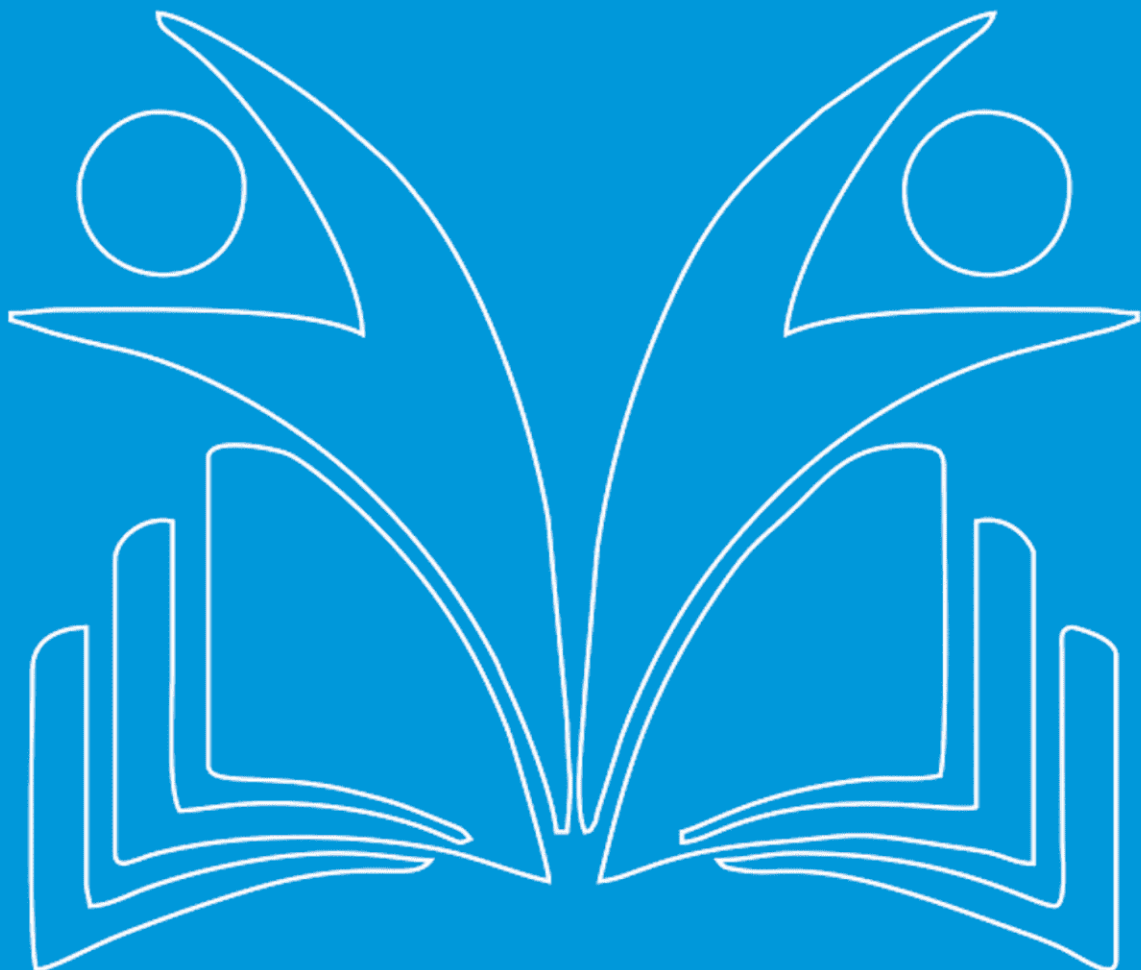


10.37423/220305526

TECHNOLOGY OF THE STEAM REFORMING OF CO₂ FOR THE SOLAR-DRIVEN THERMOCHEMICAL REACTOR ASSESSMENT: MODELLING AND COMPUTER SIMULATION

Jornandes Dias da Silva

Universidade de Pernambuco - UPE



Abstract: A gas-solid pseudo-homogeneous model is developed based on governing equations of heat and mass transfers coupled with thermochemical kinetic model in a solar-thermochemical reformer with radiative heat loss. The unknown temperature profiles are computed to study the performances of the solar- driven CO₂ reforming of methane are numerically investigated. The computational simulation of nonlinear partial differential equations (NLPDEs) has been one of the most difficult challenges for researchers worldwide because of the numerical stability requirement of the results. The developed model is described by a system of Partial Differential Equations (PDEs). The system of original EDPs is transformed into simpler system of Ordinary Differential Equations (ODEs) using the Coupled Integral Equation Approach (CIEA). Thus, the temperature profile at the surface of the solid phase and the temperature profile in the gas phase are obtained. In addition, the conversions of reactants of CH₄ and CO₂ are studied under different operating temperatures.

Keywords: Mathematical Modelling, Reforming of CO₂, Solar Energy, Thermochemical, Hydrogen

1. INTRODUCTION

The burning of fossil fuels is the main source that leads to the emissions of CO₂ into the atmosphere and, therefore, these emissions contribute for the global warming. The issues of fossil fuel depletion and climate change have resulted in development of novel solar-driven technologies as an alternative option of clean energy. Reforming processes which make use of solar heat to drive high temperature endothermic chemical reactions are known as solar photo-thermochemical processes. Solar photo-thermochemical reforming is based in the use of concentrated solar energy as a heating source of high temperature for conducting an endothermic chemical transformation (Villafán-Vidales et al., 2017; Anjos et al., 2019). The solar reforming technology can be used to produce renewable energies (as solar hydrogen production) as from solar photo-thermochemical reaction systems (STRSs). Actually, hydrogen (H₂) has a long tradition as an energy carrier and as an important raw material in chemical industries and refineries (Cruz and Silva, 2017; Silva and Abreu, 2016). Theoretically, all hydrogen produced today is sourced from fossil fuels using the steam reforming of methane as principal process. Hydrogen (H₂) production from steam reforming process of light hydrocarbon is a worldwide need nowadays (Abdesslem et al., 2013).

Solar driven carbon dioxide (CO₂) reforming of methane (SDCDRM) can be considered as a promising process for producing solar hydrogen (H₂). The SDCDRM is based on the utilization of concentrated solar irradiation (CSI) as an energy source to maintain high operating temperature. Accordingly, it was defined the concept of solar photo-thermochemical reactor (SPR) to study the SPR process. SPR is an important and valuable device for process intensification where many applications can be carried out at high operating temperature. When compared with conventional reactors, SPR reports several advantages, such as high surface-to-volume ratio and excellent mass and heat transfer performances (Chen et al., 2018; Jin et al., 2018). This SPR model became an efficient laboratory device for processing heterogeneously catalyzed gaseous reactions.

The modelling of SPR is still an open issue, thus the topic is a very actual subject for renewable energy engineering. In this context, fluid-solid pseudo-homogeneous (FSPH) models are often used to model the heterogeneous catalytic systems taking into account the effects of intraparticle processes only by means of effectiveness factors (Anjos et al., 2017; Silva et al., 2019; Matienzo, 2018). The FSPH models are widely used to model heterogeneous systems since these models handle all processes occurring simultaneously in the fluid phase.

In this work, a mathematical model has been developed to investigate the heat and mass transfer phenomena coupled with thermochemical reaction kinetics in SPR. The performance from SPR using the SDCDRM process is numerically investigated in terms of the temperature profiles in the gaseous and solid phases. On the other hand, it was also studied the production H₂ as well as conversions of CH₄ and CO₂ in SPR.

2. SOLAR THERMOCHEMICAL MODELLING

2.1. PHYSICAL DESCRIPTION OF THE PROBLEM

Among last two decades, some researches have proven the efficient use of the solar energy to drive the highly endothermic reforming reactions. For this purpose, a schematic setup (see Fig. 1) was employed to study the SDCDRM process in STR.

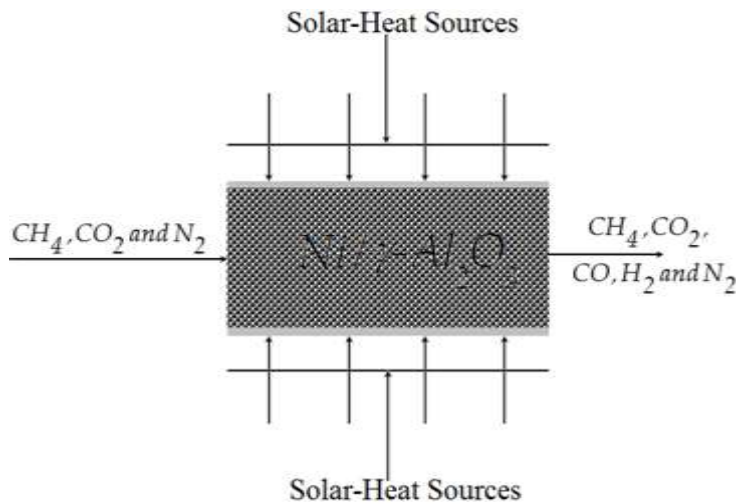
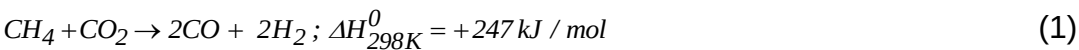


Figure 1: Schematic setup from SPR

2.2. KINETIC MECHANISM

The reforming reaction of CO₂ is essential to produce H₂ and syngas (H₂ e CO) which are highly endothermic. The SDCDRM process has a limited equilibrium and comprises one reforming reaction as follows.



The component models of these reactions are defined as methane (CH₄), carbon dioxide (CO₂), carbon and monoxide (CO), hydrogen (H₂).

2.3. KINETIC MODELLING

The overall rate equation of the reaction, Eq. (1), is based on the Langmuir-Hinshelwood kinetic model and it can be found in Chen et al., (2018) as follows.

$$R_{SDCDRM} = \frac{k_{SDCDRM} K_{CH_4} K_{CO_2} P_{CH_4} P_{CO_2}}{\left(1 + K_{CH_4} P_{CH_4} + K_{CO_2} P_{CO_2}\right)^2} \quad (2)$$

In Eq. (2), R_{SDCDRM} (kmol/kgcat.h) is the kinetic rate from SDCDRM reaction; k_{SDCDRM} (kmol/kgcat.h) is the kinetic rate constant from SDCDRM reaction, K_{CH_4} is the surface adsorption equilibrium constant of CH₄, K_{CO_2} (kPa⁻¹) is the surface adsorption equilibrium constant of CO₂, P_{CH_4} (kPa) is the partial pressure of CH₄, P_{CO_2} (kPa) is the partial pressure of CO₂, respectively.

The net rates of each chemical components (r_i , $i = CH_4, CO_2, CO$ and H_2) are computed in Tab. 1 and can be found in Reference (Cruz and Silva, 2017).

Table 1. Net rates of components i from Eq. (1).

Components	Equations of net rates	Components	Equations of net rates
CH ₄	$r_{CH_4} = -\eta_1 R_{SDCDRM}$	CO	$r_{CO} = +\eta_1 R_{SDCDRM}$
CO ₂	$r_{CO_2} = -\eta_1 R_{SDCDRM}$	H ₂	$r_{H_2} = +\eta_1 R_{SDCDRM}$

2.4 SPR MODELLING

A theoretical dynamic equation is developed to describe the heat transfer process of the gas phase on directly irradiated gas-solid SPR. The developed equation provides clear information to conduct the temperature distribution of the gas phase in porous medium reactive packed bed. The governing energy balance of the gas phase in porous medium SPR in together with its initial and boundary conditions are built as follows.

$$\sum_{i=1}^4 \rho_{g,i} C_{p,g,i} \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + \frac{4q_g}{\pi d_\mu^2} \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) = \lambda_{g,eff} \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} - h_{gs} \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b} \frac{6}{d_p} (T_g - T_s); 0 \leq z \leq L_z, t > 0 \quad (3)$$

$$T_g \Big|_{t=0, 0 \leq z \leq L_z} = 0 \quad (4)$$

$$\lambda_{g,eff} \frac{\partial T_g}{\partial z} \Big|_{z=0^+, t \geq 0} = \rho_g C_{p,g} \frac{4q_g}{\pi d_\mu^2} \left(T_g \Big|_{z=0^+, t \geq 0} - T_{g,in} \right) \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial T_g}{\partial z} \right|_{z=L_z, t \geq 0} = 0 \quad (6)$$

In Equations (3)-(6), $C_{p,g}$ (kJ/kg K) is the molar heat capacity at constant pressure of the gas mixture, T_g (K) is the gas temperature, z (m) is the axial direction, respectively; $\lambda_{g,eff}$ (W/m K) is the effective thermal conductivity of the gas phase, h_{gs} (W/m² K) is the gas-solid heat transfer coefficient, d_p (m) is the diameter of the solid particles, T_s (K) is the solid temperature, respectively.

The reactive packed bed consists of a particle network structure with porosity typically of about 40-60%. The tortuous structure of sphere particles could also give rise some turbulence with a concomitant increase in heat transfer between the solid and fluid phases. The thermal storage takes place on the solid particles to ensure sufficient energy for processing the endothermic reactions from the SDCDRM process. In the presence of radiation, the energy balance equation for temperature at the surface of the solid phase together with initial and boundary conditions are given as follows.

$$\rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \left(\lambda_{s,eff} = \lambda_s (T_{g,0}) + \frac{16 n^2 \sigma T_\infty^3}{3 k_R} \right) \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} + \rho_s \frac{(1-\varepsilon_p)}{\varepsilon_p} \Delta H_1 \eta_1 R_1 + h_{gs} \frac{6}{d_p} \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b} (T_g - T_s) - \varepsilon_w A_{cs} \sigma (T_s^4 - T_\infty^4); 0 \leq z \leq L_z, t > 0 \quad (7)$$

$$T_s|_{t=0, 0 \leq z \leq L_z} = 0 \quad (8)$$

$$-\lambda_s (T_{g,0}) \frac{\partial T_s}{\partial z} \bigg|_{z=0^+, t \geq 0} = \frac{DNI}{L_z} \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial T_s}{\partial z} \right|_{z=L_z, t \geq 0} = 0 \quad (10)$$

In Equations (7)-(10), ρ_s (kg/m³) is the density of the solid phase, $C_{p,s}$ (kJ/kg K) is the molar heat capacity at constant pressure of the solid phase, λ_s (W/m K) is the solid thermal conductivity, $q_{irrad.}$ (W/m²) is the irradiative heat flux, ε_p (m³gas/m³reactor) is the void fraction of the solid phase, ΔH_j (kJ/kmol) is the heat of reaction, η_1 (-) is the effectiveness factor, R_j (kmol/kg_{cat.} h) is the overall rate of reaction j , ε_w (-) is the emissivity of wall, A_{cs} (m²) is the cross-cut section area, σ (W/m² T⁴) is the Stefan-Boltzmann constant, and T_∞ (K) is the ambient temperature, respectively.

The mass balance equations are presented for each component i ($i = \text{CH}_4, \text{CO}_2, \text{CO}$ and H_2) in SPR. A PHM model is developed to report every chemical component i in detail. In this model, it is assumed

that the gas properties and flow at the inlet cross-section of the reactor are uniform. Thus, the mass balance equation of chemical components i with its suitable initial and boundary conditions for SPR are given as follows.

$$\varepsilon_b \frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{4q_g}{\pi d_\mu^2} \frac{\partial C_i}{\partial z} = \varepsilon_b D_{ax,i} \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} + \rho_s \eta_1 \sum_{i=1}^4 r_i; 0 \leq z \leq L_z, t > 0 \quad (11)$$

$$C_i|_{t=0, 0 \leq z \leq L_z} = 0 \quad (12)$$

$$\varepsilon_b D_{ax,i} \frac{\partial C_i}{\partial z} \Big|_{z=0^+, t \geq 0} = \frac{4q_g}{\pi d_\mu^2} (C_i|_{z=0^+, t \geq 0} - C_{i,in}) \quad (13)$$

$$D_{ax,i} \frac{\partial C_i}{\partial z} \Big|_{z=L_z, t \geq 0} = k_{g,i,eff} (C_\infty - C_i|_{z=L_z, t \geq 0}) \quad (14)$$

In Equations (11)-(14), C_i (mol/m³) is the concentration of components i at the surface of catalyst particles, Q_g (m³/min) is the gas flow rate, d_μ (m) is the inner diameter from SPR, $D_{ax,i}$ (m²/min) is the axial mass dispersion coefficient of components i , r_i (kmol/kg_{cat.} min) is the net rates from components i , respectively.

2.5 APPLICATION OF THE CIEA METHODOLOGY

For solving the equations system, i.e., Equations (3)-(14) were resolved using the CIEA methodology. This methodology is used to transform EDPs into EDOs taking into account the boundary conditions. Here, it was used the expressions below to transform EDPs into EDOs in together with the boundary conditions.

$$\bar{f}_j(t) = \frac{1}{L_z} \int_0^{L_z} f_j(z,t) dz; j = g, s \text{ and } i \quad (15)$$

$$f_j(L_z,t) - f_j(0,t) \cong \frac{L_z}{2} \left[\frac{\partial f_j(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} + \frac{\partial f_j(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=L_z} \right]; j = g, s \text{ and } i \quad (16)$$

$$\bar{f}_j(t) \cong \frac{L_z}{2} [f_j(0,t) + f_j(L_z,t)] + \frac{L_z^2}{12} \left[\frac{\partial f_j(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} - \frac{\partial f_j(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=L_z} \right]; j = g, s \text{ and } i \quad (17)$$

It is possible to transform the equations system, Equations (3)-(14), applying Eqs. (15)-(17) using the boundary conditions of each EDP. Thus, transformed equations are reported as follows.

$$\frac{d\bar{T}_g(t)}{dt} = \alpha_{g,7} \bar{T}_g(t) + \alpha_{g,8} \bar{T}_s(t) + \alpha_{g,9} T_{g,in}. \quad (18)$$

$$\frac{d\bar{T}_s(t)}{dt} = -\beta_{s,1} \bar{T}_s(t) + \beta_{s,1} \bar{T}_g(t) - \beta_{s,2} \bar{T}_s^4(t) + \beta_{s,2} T_{s,\infty}^4 + \beta_3 \bar{R}_1(t) + \beta_4 \quad (19)$$

$$\frac{d\bar{C}_i(t)}{dt} = \gamma_{14} \bar{C}_i(t) + \frac{\rho_s \eta_l}{\varepsilon_b} \sum_{i=1}^4 \bar{r}_i(t) + \gamma_{15}; i=CH_4, CO_2, CO, H_2 \quad (20)$$

All coefficients from Equations (18)-(20) are presented in Annexes A, B and C, respectively.

2.6 APPROXIMATION OF THE FULL SOLUTION

In order to solve the governing equations of the engineering problems, several numerical methods have been developed to solve EDPs. The choice of method is dependent on the desired accuracy as well as concerns about the stability and robustness of the system while maintaining computational efficiency. With respect to the transformed equations, Equations (18)-(20), they are solved by Runge-Kutta Gill method. On the other hand, the full solution is approximated using Eqs. (21)-(23) as follows.

$$T_g(z,t) = \frac{1}{2} T_g(z,t) \Big|_{t=0} + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{T}_g(t) \sin\left(\frac{k \pi z}{L_z}\right) \quad (21)$$

$$T_s(z,t) = \frac{1}{2} T_s(z,t) \Big|_{t=0} + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{T}_s(t) \sin\left(\frac{k \pi z}{L_z}\right) \quad (22)$$

$$C_i(z,t) = \frac{1}{2} C_i(z,t) \Big|_{t=0} + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{C}_i(t) \sin\left(\frac{k \pi z}{L_z}\right); i=CH_4, CO_2, CO, H_2 \quad (23)$$

3 RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. MODEL PARAMETERS FOR SIMULATIONS

A mathematical model has been used to investigate the performance from the SPR using the thermochemical energy of the reforming reaction (Eq. (1)). In Section 2, a full model is developed for simulating the heat and mass transfer processes coupled with thermochemical reaction kinetic in the

SPR. A computational algorithm using the FORTRAN 95 was elaborated by the authors to solve the model equations mentioned in this work. The parameter values used to feed the computational algorithm are shown in Tab. 2 below.

Table 2. Reference parameters of the kinetic Modelling of the SDCDRM process in SPR.

Feed parameters	Values	References
k_{SDCDRM} (kmol/ kg _{cat} .sec.)	5.775×10^5	Chein et al., (2017)
K_{CH_4} (kPa ⁻¹)	2.4317×10^{-6}	Chein et al., (2017)
K_{CO_2} (kPa ⁻¹)	3.9008×10^{-5}	Chein et al., (2017)
P_{CH_4} (kPa)	5.5664	Cruz and Silva, (2017)
P_{CO_2} (kPa)	4.8471	Cruz and Silva, (2017)
$T_{g,0}$ (K)	300	Estimated
$T_{s,0}$ (K)	2000	Estimated
$d\mu$ (mm)	2.00	Estimated
d_p (mm)	0.10	Estimated
L_z (mm)	20.00	Estimated
q_g (m ³ sec ⁻¹)	$(2.536-5497) \times 10^{-6}$	Estimated
$P_{op.}$ (kPa)	650	Estimated
ε_b (m ³ gas/m ³ reactor)	0.41	Silva et al., (2019)
$\lambda_{g,eff.}$ (W/m K)	107.383	Chen et al., (2018)
h_{gs} (Wm ⁻² K ⁻¹)	1.9561	Chen et al., (2018)
$C_{p,g}$ (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	35.00	Chen et al., (2018)
ρ_g (kg m ⁻³)	0.3857	Cruz and Silva, (2017)
ρ_s (kg m ⁻³)	3200	Cruz and Silva, (2017)
$C_{p,s}$ (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	336	Silva and Abreu, (2016)
$\lambda_{s,(T_{g,0})}$ (W/m K)	126.115	Chen et al., (2018)
n (-)	1.00	Chen et al., (2018)

Table 2. Reference parameters of the kinetic Modelling of the SDCDRM process in SPR (Continuity).

Feed parameters	Values	References
σ (W m ⁻² T ⁻⁴)	2.67x10 ⁻⁸	Chen et al., (2018)
k_R (m ⁻¹)	1.738x10 ⁴	Chen et al., (2018)
ε_p (m ³ gas/m ³ reactor)	0.47	Silva et al., (2019)
$(\Delta H_1)^{SDCDRM}$ (kJ/kmol ⁻¹)	293.872	Cruz and Silva, (2017)
η_1 (-)	0.0219	Cruz and Silva, (2017)
ε_w (-)	0.92	Abdesslem et al., (2013)
A_{cs} (m ²)	279	Abdesslem et al., (2013)
T_∞ (K)	300	Estimated
D_{ax, CH_4} (m ² /sec.)	9.32x10 ⁻⁶	Cruz and Silva, (2017)
D_{ax, CO_2} (m ² /sec.)	4.95x10 ⁻⁶	Cruz and Silva, (2017)
$D_{ax, CO}$ (m ² /sec.)	1.13x10 ⁻⁵	Cruz and Silva, (2017)
D_{ax, H_2} (m ² /sec.)	8.21x10 ⁻⁶	Cruz and Silva, (2017)
$k_{g, CH_4, eff.}$ (m/sec.)	0.289	Silva et al., (2019)
$k_{g, CO_2, eff.}$ (m/sec.)	0.697	Silva et al., (2019)
$k_{g, CO, eff.}$ (m/sec.)	0.379	Silva et al., (2019)
$k_{g, H_2, eff.}$ (m/sec.)	0.134	Silva et al., (2019)
C_∞ (kg/m ³)	0.00	Estimated

Figure 2 reports the temperature profile at the solid phase's surface and temperature profile of the gas phase along SPR length, respectively. As shown in Fig. 2, the temperature profile at the solid phase's surface increases of 700 K to more or less 1070 K, while the temperature profile of the gas phase increases from 700 K to more or less 975 K.

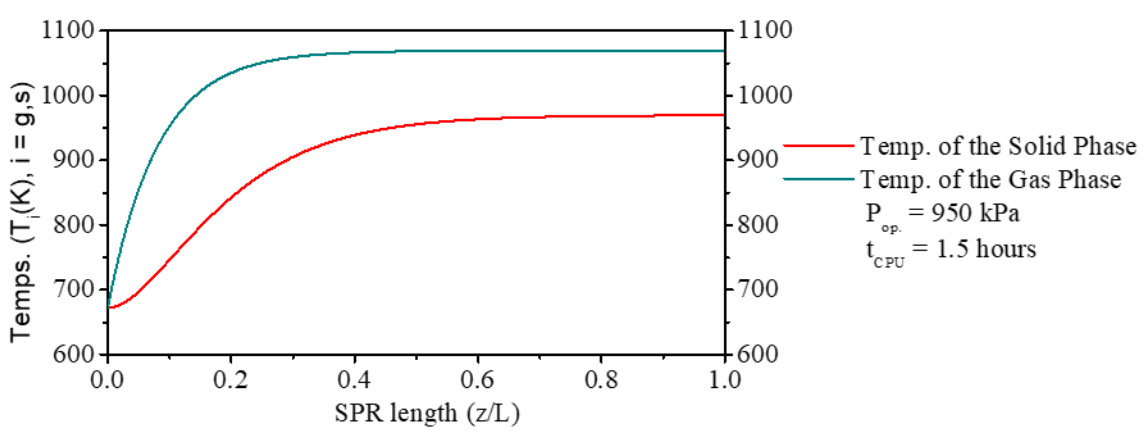


Figure 2. Average temperature profile at the surface of the solid phase and average temperature profile of the gas phase.

Figure 3 investigates the profiles of mole concentration for each component i in SPR. In this figure, the mole concentration profiles of the reactants (CH_4 and CO_2) and products (CO and H_2) have been reported in SPR. CH_4 was consumed in only 38.37% of the SPR length, after that a stable state is reached up to $z/L = 1.0$. On the other hand, CO_2 was consumed in only 42.93% of the SPR length, after that stable states are achieved until $z/L = 1.0$. After reaching 37.32% of the SPR length, H_2 and CO achieve stable states with values of 33.71% and 27.59% at $z/L = 1.0$.

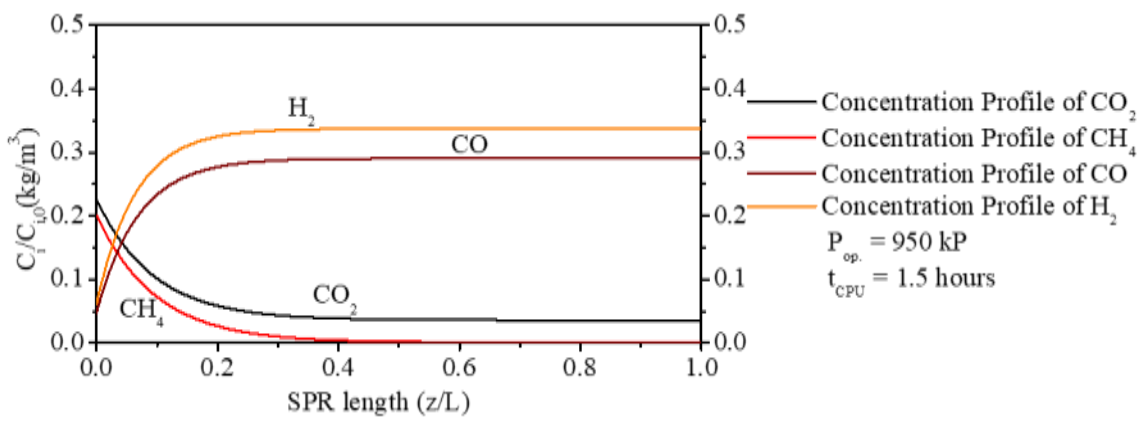


Figure 3. Average concentration profile of components CH_4 , CO_2 , CO and H_2 inside the SPR

4. CONCLUSIONS

The heat transfer and thermochemical performance of the SRT process are numerically investigated with radiative heat loss. A computer code to simulate and analyze the performance of the thermochemical process variables allowed the following conclusions:

1. The average temperature profile at the surface of the solid phase increases from 700 K to more or less 1070 K whereas the average temperature profile of the gas phase increases from 700 K to more or less 975 K;
2. The production of H₂ was of 33.71 % at the outlet of the lumped-particle packed bed from SPR.

REFERENCES

- Abdesslem, J., Khalifa, S., Abdelaziz, N. and Abdallah, M., 2013. Radiative properties effects on unsteady natural convection inside a saturated porous medium. Application for porous heat exchangers. *Energy*, Vol. 61, pp. 224-233.
- Anjos, E., Damasceno, J., Oliveira, C., Silva, A. and Silva, J., 2018. Numerical Analysis of the steam reforming of toluene to produce hydrogen in a fixed bed catalytic reactor. In *Proceedings of the 17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT 2018*. Águas de Lindoia - SP, Brazil.
- Anjos, E., Oliveira, C. and Silva, J., 2019. Dynamic analysis to produce hydrogen in a fixed bed catalytic reactor by the steam reforming of toluene. *Chemical Engineering Transaction*, Vol.74, pp. 553-558.
- Anjos, E., Silva, J. and Damasceno, J., 2017. "Dynamic analysis of a three-phase reactor of fixed bed for petroleum and petrochemical Industry. In *Proceedings of the 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2017*. Curitiba-PR, Brazil.
- Chein, R. Y., Hsu, W. H. and Yu, C. T., 2017. Parametric study of catalytic dry reforming of methane for syngas production at elevated pressures. *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 42, pp. 14485-14500.
- Chen, X., Wang, F., Yan X., Han, Y., Chen Z. and Jie Z., 2018. Thermochemical performance of solar driven CO₂ reforming of methane in volumetric reactor with gradual foam structure. *Energy*, Vol. 151, pp. 545-555.
- Cruz, B. M. and Silva, J. D., 2017. A two-dimensional mathematical model for the catalytic steam reforming of methane in both conventional fixed-bed and fixed-bed membrane reactors for the Production of hydrogen. *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 42, pp. 23670-23690.
- Jin, J., Wei, X., Liu, M., Yu, Y., Li, W., Kong, H. and Hao, Y., 2018. A solar methane reforming reactor design with enhanced efficiency. *Applied Energy*, Vol. 226, pp. 797-807.
- Matienzo, J. M. R., 2018. Influence of addition of hydrogen produced on board in the performance of a stationary diesel engine. *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 43, pp. 17889-17897.
- Silva, J. D. and Abreu, C. A. M., 2016. Modelling and simulation in conventional fixed-bed and fixed-bed membrane reactors for the steam reforming of methane. *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 41, pp. 11660-11674.
- Silva, P. B. A., Carvalho, J. D. C. G., Silva, J. D., 2019. "Hydrogen adsorption on Ni/γ-Al₂O₃ in a fixed-bed adsorber: Experimental validation and numerical modelling". *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 44, pp. 304-317.
- Villafán-Vidales, H. I., Arancibia-Bulnes, C. A., Riveros-Rosas, D., Romero-Paredes, H., Estrada, C. A., 2017. "An overview of the solar thermochemical processes for hydrogen and syngas production: Reactors, and facilities". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 75, pp. 894-908.

ANNEX A:

$$\alpha_{g,1} = \frac{L_z}{2} + \sum_{i=1}^4 \rho_{g,i} C_{p,g,i} \frac{L_z^2}{3} \frac{q_g}{\pi d_\mu^2 \lambda_{g,eff}(T_{g,0})}; \alpha_{g,2} = \sum_{i=1}^4 \rho_{g,i} C_{p,g,i} \frac{L_z^2}{3} \frac{q_g}{\pi d_\mu^2 \lambda_{g,eff}(T_{g,0})} \quad (A1)$$

$$\alpha_{g,3} = \sum_{i=1}^4 \rho_{g,i} C_{p,g,i} \frac{2L_z q_g}{\pi d_\mu^2 \lambda_{g,eff}(T_{g,0})}; \alpha_{g,4} = \alpha_{g,1} + \frac{L_z}{2} (1 + \alpha_{g,3}); \alpha_{g,5} = \frac{1 + \alpha_{g,3}}{\alpha_{g,4}} \quad (A2)$$

$$\alpha_{g,6} = \frac{\alpha_{g,3} [(1 + \alpha_{g,3}) - \alpha_{g,4}]}{\alpha_{g,4}}; \alpha_{g,7} = \frac{4q_g}{\pi d_\mu^2} \left(\frac{2 - \alpha_{g,4} \alpha_{g,5}}{\alpha_{g,4}} \right) - \frac{h_{gs}}{\sum_{i=1}^4 \rho_{g,i} C_{p,g,i} d_p} \frac{6}{\varepsilon_b} \frac{(1 - \varepsilon_b)}{\varepsilon_b} \quad (A3)$$

$$\alpha_{g,8} = \frac{h_{gs}}{\sum_{i=1}^4 \rho_{g,i} C_{p,g,i} d_p} \frac{6}{\varepsilon_b} \frac{(1 - \varepsilon_b)}{\varepsilon_b}; \alpha_{g,9} = \frac{4q_g}{\pi d_\mu^2} \left(\frac{\alpha_{g,3}}{\alpha_{g,4}} - \alpha_{g,6} - 1 \right) \quad (A4)$$

ANNEX B:

$$\beta_{s,1} = \frac{h_{gs}}{\rho_s C_{p,s}} \frac{6}{d_p} \frac{(1 - \varepsilon_b)}{\varepsilon_b}; \beta_{s,2} = \frac{\varepsilon_w A_{cs} \sigma}{\rho_s C_{p,s}}; \beta_{s,3} = \frac{(1 - \varepsilon_b)}{\varepsilon_b C_{p,s}} \Delta H_1 \eta_1; \quad (B1)$$

$$\beta_{s,4} = \frac{\lambda_{s,eff}(T_{g,0})}{\rho_s C_{p,s} L_z^2 \lambda_s(T_{g,0})} DNI$$

ANNEX C:

$$\gamma_1 = L_z \left(\frac{1}{2} + \frac{L_z q_g}{3 \pi d_\mu^2} \right); \gamma_2 = \frac{L_z}{2} \left(1 + \frac{L_z k_{g,i,eff}}{6} \right); \gamma_3 = \frac{L_z^2}{3} \left(\frac{q_g}{\pi d_\mu^2} C_{i,in.} - \frac{k_{g,i,eff}}{6} C_\infty \right) \quad (C1)$$

$$\gamma_4 = 1 + \frac{L_z}{2} k_{g,i,eff}; \gamma_5 = 1 + \frac{2L_z q_g}{\pi d_\mu^2}; \gamma_6 = \frac{L_z}{2} k_{g,i,eff} C_\infty - \frac{2L_z q_g}{\pi d_\mu^2} C_{i,in.}; \gamma_7 = \gamma_1 + \frac{\gamma_2 \gamma_5}{\gamma_4} \quad (C2)$$

$$\gamma_8 = \gamma_3 + \frac{\gamma_2 \gamma_6}{\gamma_4}; \gamma_9 = \frac{\gamma_5}{\gamma_4 \gamma_7}; \gamma_{10} = \frac{1}{\gamma_4} \left(\frac{\gamma_5 \gamma_8}{\gamma_7} - \gamma_6 \right); \gamma_{11} = \frac{4q_g}{\varepsilon_b \pi d_\mu^2} + D_{ax,i} k_{g,i,eff}; \quad (C3)$$

$$\gamma_{12} = \frac{4q_g}{\pi d_\mu^2} \left(\frac{1}{\varepsilon_b} - D_{ax,i} \right)$$

$$\gamma_{13} = D_{ax,i} \left(k_{g,i,eff} C_\infty + \frac{4q_g}{\pi d_\mu^2} C_{i,in.} \right); \gamma_{14} = \frac{\gamma_{12}}{\gamma_7} - \gamma_{11} \gamma_9; \gamma_{15} = \gamma_{11} \left(\frac{\gamma_8}{\gamma_7} - \gamma_{10} \right) + \gamma_{13} \quad (C4)$$

Capítulo 3

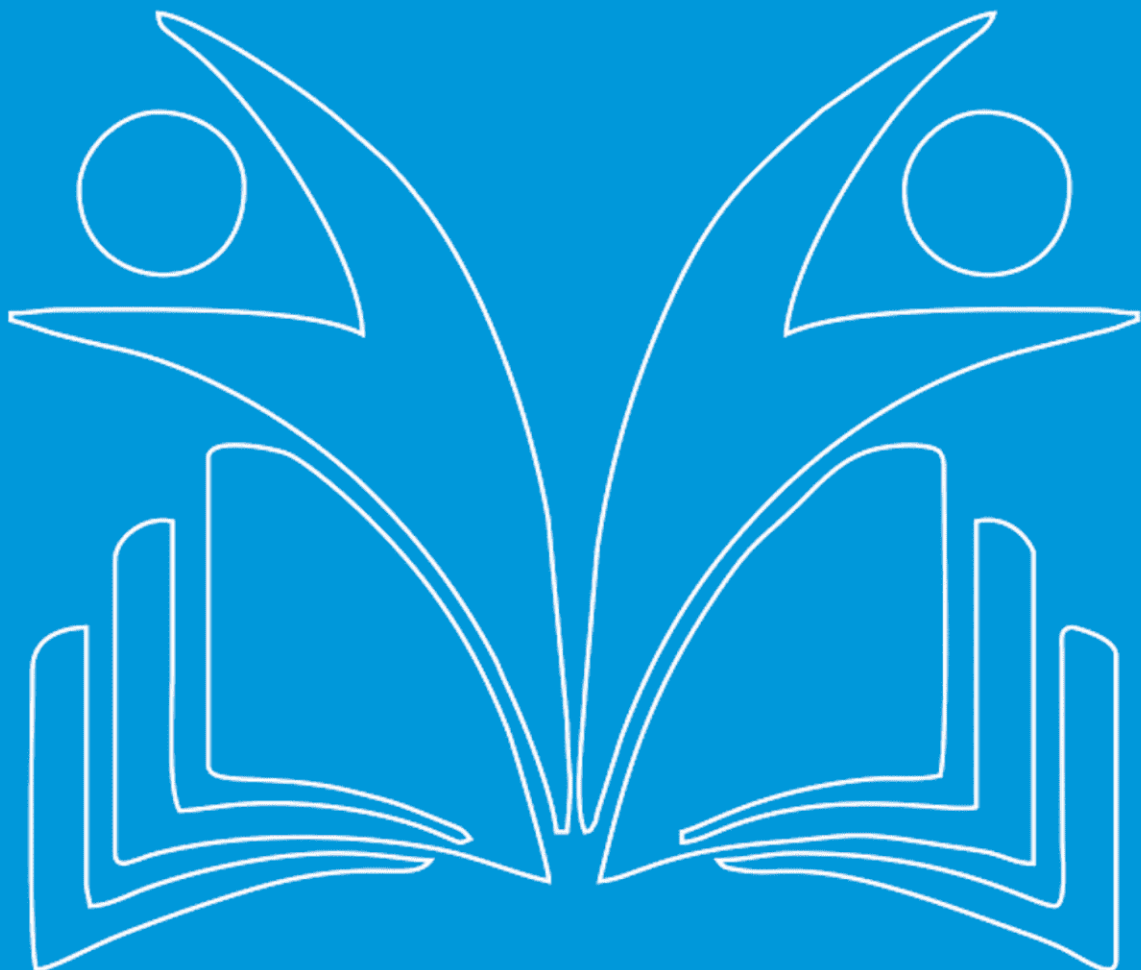


10.37423/220305563

AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE CARBONIZAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL APLICADA À INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

Antão Rodrigo Valentim

Instituto Federal do Paraná



Resumo: A humanidade é dependente do carvão. Utiliza-o para atividades com fins domésticos, como o cozimento de alimentos, e para o fornecimento de energia para aos mais diversos processos de produção industrial. Na indústria siderúrgica é o principal elemento, juntamente com o minério de ferro, na produção do ferro-gusa e aço. A maior parte do carvão empregado na indústria siderúrgica é de origem mineral, sua utilização gera um grande impacto ambiental pois durante o processo de produção, produz uma considerável quantidade de gases de efeito estufa (GEE). Assim, o setor siderúrgico vem se esforçando para reduzir seu emprego, migrando para o uso do carvão vegetal, que no balanço das emissões dos GEE, na cadeia produtiva do ferro-gusa e aço, são reduzidas drasticamente. Nesse sentido, o objetivo do presente estudo é realizar uma revisão bibliográfica sistematizada sobre as tecnologias de fornos de carbonização, que produzem carvão vegetal com as propriedades requeridas para utilização na indústria siderúrgica.

Palavras-chaves: carvão vegetal, forno de carbonização, ferro-gusa.

1. INTRODUÇÃO

A humanidade ainda é dependente da lenha e do carvão. Estima-se que aproximadamente 2,4 bilhões de pessoas fazem uso de destes materiais para realizar o cozimento dos alimentos, e muitas empresas usam lenha e carvão para seus processos de fabricação, entre eles, o chá e o tijolo [1].

De toda a madeira usada como combustível no mundo, estima-se que 17% sejam convertidos em carvão vegetal. No ano de 2016 aproximadamente 51 milhões de toneladas de carvão vegetal foram produzidas no mundo, somente o continente Africano produziu 34 milhões de toneladas; América Latina e Caribe produziram 9 milhões de toneladas; a região da Ásia-Pacífico, respondeu pela produção de aproximadamente 9 milhões de toneladas [2]. Apesar do continente Africano produzir o correspondente a 66% da produção mundial, o Brasil manteve o protagonismo mundial na produção de carvão vegetal, produzindo em 2016 aproximadamente 5 milhões de toneladas [3].

A maior parte do carvão vegetal produzido no mundo, ocorre em fornos de carbonização que empregam tecnologias de baixa eficiência, resultando em perdas substanciais de madeira e energia. Fornos dos tipos: poço da terra, monte de terra Casamança, Reator de Adão, forno de Declive, forno de Beehive (ou forno de superfície), forno retangular e meia laranja argentino [4]. No Brasil a produção de carvão vegetal é realizada predominantemente em fornos do tipo “hot-tail” ou “rabo-quente”, que possuem baixo rendimento gravimétrico, entre 24% a 29%, com ciclo de carbonização que podem variar de 7 a 12 dias. São fornos fabricados com tijolos cerâmicos convencionais e possuem capacidade de carga entre 7 m³ a 70 m³ [5].

A indústria siderúrgica brasileira, apresenta como diferencial, em relação aos demais países, a utilização do carvão vegetal, de forma parcial, em substituição ao carvão mineral na produção do ferro-gusa e do aço, e que por esta característica recebe o nome de “aço verde”. Trata-se de uma grande vantagem ambiental, devido ao sequestro de carbono e liberação de oxigênio, pela fotossíntese, que ocorrem nas florestas plantadas para produção do carvão vegetal [6]. Quando empregado em altos-fornos de pequenas dimensões, com volume entre 50 a 350 m³, para a produção de 1 tonelada de ferro-gusa, com carvão vegetal, são sequestradas cerca de 890 kg de CO₂ e ainda há geração de 203 kg de oxigênio[7].

Em 2016, 11% do aço produzido no Brasil utilizaram carvão vegetal como agente redutor. Para o mesmo ano, da madeira utilizada para a produção de carvão vegetal, 86% tiveram origem em florestas das próprias siderúrgicas, 12% em florestas plantadas por terceiros e 2% a partir de resíduos florestais

legalizados. Para o ano de 2017, da madeira utilizada para a produção de carvão vegetal, 92% foram oriundas de florestas plantadas das próprias siderúrgicas, 7% de terceiros e 1% de resíduos florestais devidamente legalizados [8].

A produção do aço verde é extremamente interessante, comercialmente, pois a produção do aço de modo mais sustentável torna-se um diferencial competitivo, garantindo um maior preço de venda, em relação aos produtos siderúrgicos produzidos utilizando o carvão mineral. [9].

Especificamente para produção do ferro-gusa, o carvão vegetal representa em média 40% a 50% do custo de produção [5]. Nesse sentido, é de extrema importância a redução do custo de produção do carvão vegetal. Uma das alternativas para alcançar este objetivo é aumentar o rendimento do processo de produção através do aumento do rendimento gravimétrico do forno ou diminuição do tempo do ciclo de carbonização da madeira, aumentando a produtividade do processo produtivo [10][9][5].

A qualidade requerida do carvão vegetal empregado em altos-fornos, está ligada com a qualidade da madeira (composição química e densidade) e controle do processo de carbonização. Comparando as características físicas e químicas do carvão vegetal com o carvão de origem mineral, o primeiro apresenta as vantagens de possuir menor teor de cinzas e ausência de enxofre [11]. É importante ressaltar que devido as suas propriedades, como baixa densidade e baixa resistência a compressão, o carvão vegetal não substituiu completamente o carvão mineral, no processo de produção do ferro-gusa em altos-fornos [12].

No Brasil o maior consumo de carvão vegetal fica atribuído aos denominados guseiros independentes, que formam um conjunto de empresas produtoras de ferro-gusa, o qual posteriormente é utilizado nas siderúrgicas para produção do aço. A utilização do carvão vegetal por estas empresas ocorre devido as menores dimensões dos seus altos-fornos, uma vez que o uso de carvão vegetal em grandes altos-fornos é limitado por sua baixa resistência a compressão [13].

Estudos realizados até o momento sobre a utilização do carvão vegetal, obtidos a partir de diferentes biomassas, apresentam, de modo geral: uma análise das propriedades da biomassa em comparação com o carvão de origem fósseis; uma análise do potencial de substituição total ou parcial do carvão mineral pelo carvão vegetal nas diferentes etapas de produção do aço e a viabilidade econômica dessa substituição [14][7][15][16]. Porém, nestes estudos não são levados em consideração qual o tipo de biomassa ou em qual tipo forno de carbonização o carvão vegetal foi produzido. Neste sentido, o presente estudo tem por objetivo, a utilização de um método de revisão bibliográfica sistematizada,

para o levantamento de tecnologias de fornos de carbonização existentes na literatura, com a finalidade de verificar se carvão vegetal produzido por estas tecnologias podem ser utilizados na produção de ferro-gusa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMATIZADA

Para realizar uma revisão bibliográfica com qualidade, sobre um determinado tema, é necessário utilizar um método que possibilite sua replicabilidade e que consiga qualificar um conjunto de artigos selecionados. Nesse sentido, a presente pesquisa utilizou como método de revisão bibliográfica a metodologia denominada como *Methodi Ordinatio*. A figura 01, apresenta o fluxograma das etapas da metodologia [17][18].

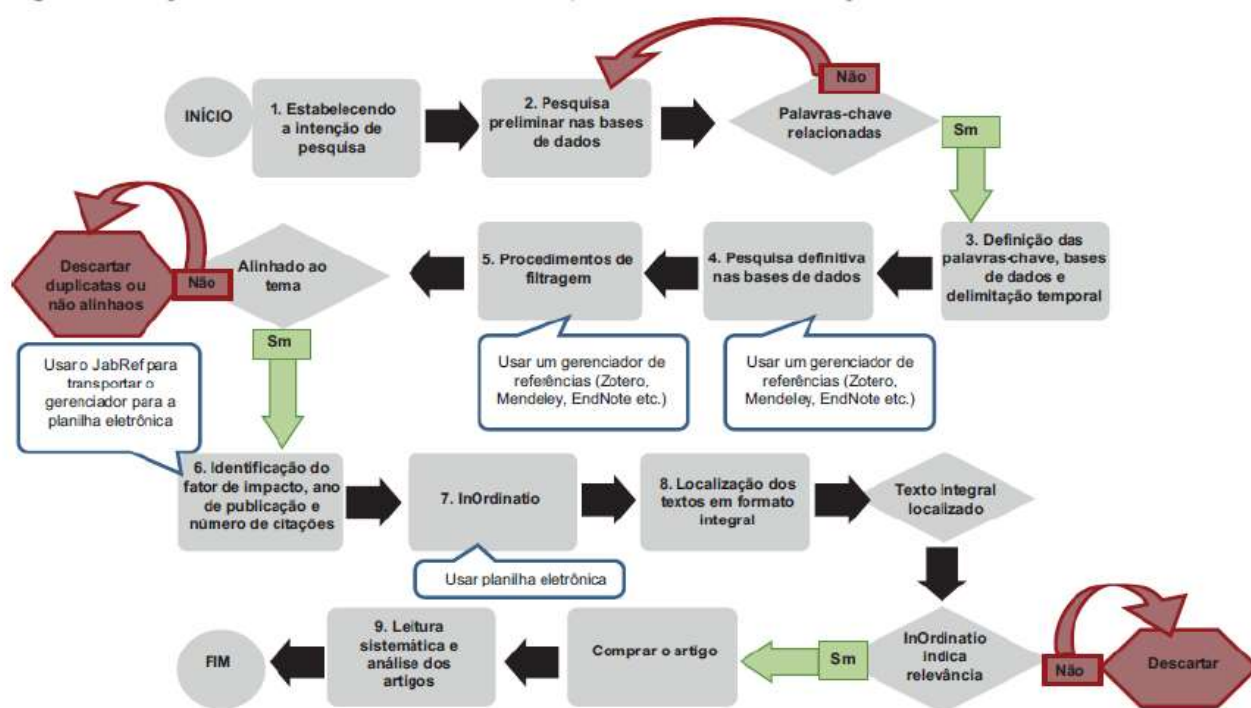


Figura 01 – Etapas do Methodi Ordinatio [18].

No início da metodologia é necessário estabelecer a intenção da pesquisa, que no presente estudo, foi uma revisão sobre as tecnologias de fornos de carbonização existentes na literatura, com a finalidade de verificar se o carvão vegetal produzido por estas tecnologias, podem ser utilizados na produção de ferro-gusa. Foram realizadas pesquisas preliminares e, em seguida, definidas as bases de dados onde seriam realizadas as buscas definitivas: *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Web of Science* e *Scopus*. Para as buscas nestas bases de dados, as palavras chaves foram organizadas em cinco grupos:

i) (Charcoal) AND (design) AND ("pyrolysis furnace*" OR "pyrolysis oven*" OR "pyrolysis kiln*"); ii) (Charcoal) AND (project) AND ("pyrolysis furnace*" OR "pyrolysis oven*" OR "pyrolysis kiln*"); iii) (Charcoal) AND (design) AND ("carbonization furnace*" OR "carbonization oven*" OR "carbonization kiln*"); iv) (Charcoal) AND (project) AND ("carbonization furnace*" OR "carbonization oven*" OR "carbonization kiln*"); e v) ("Design" OR "development" OR "project") AND ("charcoal kiln" OR "charcoal furnace" OR "retort furnace" OR "retort kiln" OR "charcoal oven*" OR "retort oven*")

2.2 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL

Para verificar a viabilidade técnica da utilização do carvão vegetal, produzido pelas diferentes tecnologias levantadas durante a revisão bibliográfica sistematizada, foi empregada como referência as propriedades do carvão vegetal utilizada pela indústria siderúrgica ACESITA, em seus dois altos-fornos, com capacidade de produção de 750 t/dia e 1.400 t/dia de ferro-gusa. As principais propriedades do carvão vegetal estão apresentadas na tabela 01 [11].

Tabela 01 – Propriedade do carvão vegetal aplicada na produção do ferro gusa, adaptado de [11].

Característica	Unidade	Carvão vegetal
Umidade	%	<5,38
Carbono Fixo	%	>78,15
Cinza	%	<1,75
Volátil	%	<20,1

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMATIZADA

Como resultado da pesquisa, nas bases de dados, foram encontradas um total de 1537 artigos, quadro 01. As pesquisas restringiram-se a busca somente de artigos científicos.

Combinação de palavras chaves		Resultados das pesquisas as bases de dados ^a				Total
		Science Direct	Scopus	Web of Science	Springer Link	
1	(Charcoal) AND (design) AND ("pyrolysis furnace*" OR "pyrolysis oven*" OR "pyrolysis kiln*")	46	1	1	274	322
2	(Charcoal) AND (project) AND ("pyrolysis furnace*" OR "pyrolysis oven*" OR "pyrolysis kiln*")	20	0	0	201	221
3	(Charcoal) AND (design) AND ("carbonization furnace*" OR "carbonization oven*" OR carbonization kiln*")	222	0	0	0	222
4	(Charcoal) AND (project) AND ("carbonization furnace*" OR "carbonization oven*" OR carbonization kiln*")	164	0	0	0	164
5	("Design" OR "development" OR "project") AND ("charcoal kiln" OR "charcoal furnace" OR "retort furnace" OR "retort kiln" OR "charcoal oven*" OR "retort oven*")	396	0	9	239	644
					Total de artigos	1573

Quadro 01 – Resultados das pesquisas as bases de dados

Posteriormente, com o auxílio do software *Mendeley*, procedeu-se a filtragem dos artigos, pela análise do seu título e resumo, verificando sua concordância com o escopo da pesquisa. Ao final desta etapa foram selecionados um total de 70 artigos.

Para aplicar a equação do *Methodi Ordinatio* (equação 01) foram necessários realizar: o levantamento do fator de impacto (FI) das revistas, nas quais os artigos foram publicados; com o auxílio do Google

Acadêmico verificar a quantidade de citações (Ci) que cada um dos artigos possuía; e atribuir um valor α , que na presente pesquisa foi igual a 5, considerando que a atualidade dos artigos não é algo tão relevante. O apêndice A, apresenta uma tabela com a classificação das publicações utilizando o InOrdinatio [17] [18]. Para garantir uma maior confiabilidade na revisão, todos os artigos com InOrdinatio positivos foram analisados, ou seja, um total de 60 artigos foram averiguados.

$$\text{InOrdinatio} = \left(\frac{\text{FI}}{1000} \right) + \alpha * [10 - (\text{Ano da pesquisa} - \text{Ano da publicação})] + (\sum \text{Ci}) \quad (1)$$

3.2 AVALIAÇÃO DOS CARVÕES VEGETAIS

Com a leitura dos 60 artigos, constatou-se que apenas 9 apresentavam propostas de tecnologias de fornos para produção de carvão vegetal, com informações suficientes sobre o carvão produzido para comparação com os valores de referência do carvão metalúrgico, conforme apresentado na tabela 01. A tabela 02, apresenta as propriedades dos carvões vegetais obtidos nos fornos de carbonização desenvolvidos nos diferentes estudos.

Tabela 02 – Propriedades dos carvões vegetais obtidos em diferentes estudos.

Referência	Biomassa	Umidade (%)	Carbono Fixo (%)	Cinza (%)	Volátil (%)
[19]	Eucalipto <i>urograndis</i>	1,70	25,72	0,97	20,25
[20]	Toras e galhos de castanha picados	3,00	80,80	2,20	17,00
[21]	Abeto	1,30	91,97	0,88	7,13
	Eucalipto	1,35	92,32	0,45	7,27
[22]	Bambu	8,50	81,00	11,30	7,70
[23]	Carvalho	2,63	79,37	4,83	13,17
	Ramos finos	1,70	78,50	9,20	10,60
	Oliveira - Galhos grossos	1,70	86,40	3,60	8,30
	Oliveira - Mistura original	1,30	51,90	37,20	9,60
[24]	Oliveira - Galhos + folhas	1,60	79,20	8,70	10,50
	Oliveira - Galhos	2,50	81,80	5,20	10,50
	Oliveria - Folhas	0,20	67,30	19,20	13,30
	Eucalipto	1,40	85,30	5,30	8,00
[25]	Casca de coco	3,18	81,20	4,48	14,32

Referência	Biomassa	Umidade (%)	Carbono Fixo (%)	Cinza (%)	Volátil (%)
[26]	Aliso	2,35	76,3	1,15	23
	Bétula	3,15	77,5	1,21	21
	Carvalho	2,05	78,5	1,41	22
	Pinheiro	3,01	74,5	0,39	25
	Abeto	3,33	74,5	0,4	33
[27]	Eucalipto	1,75	75,00	1,20	23,00
	Leucena	2,00	82,00	2,80	14,00
	Casuarina	1,95	86,00	1,50	12,00
Carvão vegetal metalúrgico [11]	Eucalipto	<5,38	>78,15	<1,75	<20,1

Comparado as propriedades do carvão vegetal, de referência, com as propriedades do carvão vegetal, obtidos pelos estudos, conforme tabela 02, constata-se que as tecnologias e biomassas que podem ser empregadas na produção de ferro-gusa são as apresentadas por: Dufourny et al. [21], utilizando como biomassa a madeira de abeto e eucalipto; Syred et al. [26] utilizando madeira de carvalho a uma pressão de trabalho de 1 bar; e Saravanakuma et al. [27] empregando como biomassa a madeira de casuarina.

O sistema de produção de carvão vegetal apresentado por Dufourny et al. [21], é um protótipo constituído de uma câmara de carbonização, fabricada em aço inoxidável, com volume de 30 litros, que em sua parte inferior possuiu uma abertura para injeção de gás nitrogênio, e na parte superior uma saída para os gases proveniente do processo de pirólise da biomassa. A câmara de carbonização é acondicionada no interior da câmara de aquecimento, que possui uma resistência tubular, com potência de 20 kW, com três zonas de aquecimento independentes, para facilitar o aquecimento homogêneo do leito de madeira. O resfriamento da câmara de carbonização ocorre por meio de convecção de ar forçado entre o reator e os elementos de aquecimento. O melhor rendimento gravimétrico do processo foi de 33,8%, para o carvão vegetal produzido a partir de eucalipto e 31,7% para o carvão vegetal produzido a partir da madeira de abeto.

Syred et al. [26], desenvolveram o processo de produção de carvão vegetal denominado *Charcoal, Heat and Power* (CHaP), que além de produzir o carvão vegetal, aproveita o calor gerado durante o processo para cogeração de energia elétrica. A carbonização da madeira ocorre em um recipiente

onde ela é mantida sob pressão em um fluxo de gás quente com deficiência de oxigênio (gerado separadamente por um gaseificador). O gás quente é recirculado em torno do vaso pelo uso de um ejetor e um recirculador de fluxo. À medida que o gás quente passa sobre a madeira, o processo de pirólise começa, os voláteis são expelidos e o carvão é formado. Os voláteis emitidos neste processo de carbonização enriquecem o gás quente e aumentam o seu poder calorífico. O rendimento gravimétrico do processo variou de acordo com a o tipo de material e a pressão de trabalho. A tabela 03 apresenta o rendimento gravimétrico.

Tabela 03 – Rendimento gravimétrico do processo para diferente pressões [26].

Biomassa	Pressão (bar)	Rendimento (%)
Aliso	1	30
	10	36
Bétula	1	29
	10	35
Carvalho	1	31
	10	40
Pinheiro	1	32
	10	35
Abeto	1	31
	10	37

Por sua vez Saravanakuma et al. [27], propôs um forno de carbonização com um corpo fabricado em chapas de aço com 3 mm de espessura, com um volume de 0,57 m³ e capacidade para armazenar 250 kg de madeira. O comprimento do forno é de 91,4 cm de largura, 76,2 cm e 82,5 cm de altura. A parte inferior do forno possui orifícios, através dos quais o ar entra na grelha, que é fixada na parte inferior do forno. Para dar início ao processo, a grelha recebe uma quantidade de 2kg de carvão vegetal, o qual é queimado por aproximadamente 15 minutos, até virar brasa. Posteriormente, o forno é completado com a madeira que será carbonizada. O fechamento do forno ocorre por uma tampa de aço, localizada na parte superior do forno, na qual existe uma chaminé para saída dos gases gerados durante o

processo. O rendimento gravimétrico do processo foi de 35% para a produção do carvão vegetal a partir da madeira Casuarina.

Para uma análise da aplicabilidade das tecnologias no cenário brasileiro, pode-se levar em consideração as características das unidades produtoras de carvão vegetal do país. Geralmente estas unidades estão localizadas próximas, ou no local, do plantio da madeira utilizada na produção do carvão vegetal. São localidades afastas dos centros urbanos com pouca infraestrutura. Essas unidades empregam mão de obra de baixa qualidade e baixa remuneração. Assim, um forno para produção de carvão vegetal torna-se mais interessante quando: mais simples for sua forma construtiva e operação; menor o seu custo de manutenção; e menor custo de aquisição. Nesse sentido, a tecnologia apresentada por Syred et al. [26] é mais indicada para o cenário brasileiro na produção de carvão vegetal.

4. CONCLUSÕES

A metodologia de revisão sistematizada *Methodi Ordinatio*, foi utilizada para busca de artigos que apresentassem tecnologias de fornos de carbonização, com o objetivo de verificar se carvão vegetal produzido por estas tecnologias podem ser utilizados na produção de ferro-gusa. As bases de dados utilizadas para pesquisa foram: ScienceDirect, SpringerLink, Web of Science e Scopus. Já as palavras chaves foram organizadas em cinco grupos: **i)** (*Charcoal*) AND (*design*) AND (“*pyrolysis furnace**” OR “*pyrolysis oven**” OR “*pyrolysis kiln**”); **ii)** (*Charcoal*) AND (*project*) AND (“*pyrolysis furnace**” OR “*pyrolysis oven**” OR “*pyrolysis kiln**”); **iii)** (*Charcoal*) AND (*design*) AND (“*carbonization furnace**” OR “*carbonization oven**” OR “*carbonization kiln**”); **iv)** (*Charcoal*) AND (*project*) AND (“*carbonization furnace**” OR “*carbonization oven**” OR “*carbonization kiln**”); e **v)** (“*Design*” OR “*development*” OR “*project*”) AND (“*charcoal kiln*” OR “*charcoal furnace*”

OR “*retort furnace*” OR “*retort kiln*” OR “*charcoal oven**” OR “*retort oven**”). Para as pesquisas as bases de dados, foi utilizada a restrição: somente artigos científicos.

No total foram encontrados 1573 artigos. Destes, após a análise dos resumos, tendo como referência o escopo da pesquisa, somente 70 artigos foram selecionados para o cálculo do InOrdinatio. Dos 70 artigos foram selecionados 62 para a análise sistemática. Durante a análise, constatou-se que somente 9 artigos apresentavam informações mínimas necessárias, sobre as propriedades do carvão vegetal, para comparação com carvão vegetal de referência. Destaca-se que possivelmente outras tecnologias

estariam aptas para produção de carvão vegetal para produção de ferro-gusa, porém devido à falta de caracterização das propriedades do carvão vegetal, as análises não puderam ser realizadas.

Comparando as propriedades do carvões vegetais produzidos pelas tecnologias apresentadas nos 9 artigos, somente podem ser empregadas na produção de ferro-gusa as tecnológicas propostas por: Dufourny et al. [21] empregando madeira de abeto e eucalipto; Syred et al [26] utilizando madeira de carvalho; e Saravanakuma et al. [27] usando madeira de casuarina,

Levando em consideração as características da indústria brasileira produtora de carvão vegetal, onde, geralmente, estão localizadas próximas, ou no local, do plantio da madeira utilizada na produção do carvão vegetal, empregam mão de obra não qualificada, e os custos de manutenção e de aquisição de equipamentos é extremamente relevante, a melhor opção de forno de carbonização é o proposto por Saravanakuma et al. [27].

REFERÊNCIAS

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations, The Charcoal Transition: Greening the charcoal value chain to mitigate climate change and, 2017.
- [2] G.F. Products, Feinstaub.End, (2016).
- [3] IBGE, Quantidade produzida na silvicultura, (2017) 1–9. doi:.1037//0033-2909.l26.1.78.
- [4] T. Rodrigues, A. Braghini Junior, Technological prospecting in the production of charcoal: A patent study, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 111 (2019) 170–183.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.080>.
- [5] CGEE, Modernização da produção de carvão vegetal, 2015.
- [6] M. Gerais, AÇO VERDE BRASILEIRO, (2018).
- [7] E. Mousa, C. Wang, J. Riesbeck, M. Larsson, Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 65 (2016) 1247–1266. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.061>.
- [8] Instituto Aço Brasil, Relatório de Sustentabilidade da indústria brasileira do aço, (2018) 84. [http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/assets/pdfs/Aço Brasil » Completo.pdf](http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/assets/pdfs/Aço%20Brasil%20»%20Completo.pdf).
- [9] R.G.D. Pinto, A.S. Szklo, R. Rathmann, CO₂ emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector—From structural to intensity effects, *Energy Policy.* 114 (2018) 380–393. doi:10.1016/j.enpol.2017.11.040.
- [10] T.F. Morello, Carbon neutral merchant pig iron in Brazil: Alternatives that allow decoupling from deforestation, *Energy Sustain. Dev.* 27 (2015) 93–104. doi:10.1016/j.esd.2015.04.008.
- [11] R. Teodoro, C. Acesita, I. Area, F.M.M.A.S. A, Charcoal , renewable energy source for steelmaking process, in: 2006.
- [12] J.C. Adam, Improved and more environmentally friendly charcoal production system using a low-cost retort–kiln (Eco-charcoal), *Renew. Energy.* 34 (2009) 1923–1925.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.009>.
- [13] E. de P. Energética, Energia no Setor Siderúrgico, Rio de Janeiro, 2009.
http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/20090430_2%5B1%5D.pdf.
- [14] H. Suopajarvi, K. Umeki, E. Mousa, A. Hedayati, H. Romar, A. Kemppainen, C. Wang, A. Phounglamcheik, S. Tuomikoski, N. Norberg, A. Andefors, M. Öhman, U. Lassi, T. Fabritius, Use of biomass in integrated steelmaking – Status quo, future needs and comparison to other low-CO₂ steel production technologies, *Appl. Energy.* 213 (2018) 384–407.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.060>.

- [15] H. Suopajärvi, A. Kemppainen, J. Haapakangas, T. Fabritius, Extensive review of the opportunities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes, *J. Clean. Prod.* 148 (2017) 709–734. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.029>.
- [16] M.-K. Bahng, C. Mukarakate, D.J. Robichaud, M.R. Nimlos, Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review, *Anal. Chim. Acta.* 651 (2009) 117–138. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.08.016>.
- [17] R.N. Pagani, J.L. Kovalski, L.M. Resende, Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication, *Scientometrics.* 105 (2015) 2109–2135. doi:10.1007/s11192-015-1744-x.
- [18] E.A.R. de Campos, R.N. Pagani, L.M. Resende, J. Pontes, Avanços na composição da Methodi Ordinatio para revisão sistemática de literatura, *Scientometrics.* 46 (2018) 815–842. doi:10.1007/s11192-018-2798-3.
- [19] F.T.M. Silva, C.H. Ataíde, Valorization of eucalyptus urograndis wood via carbonization: Product yields and characterization, *Energy.* 172 (2019) 509–516. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.159>.
- [20] A.M. Rizzo, M. Pettorali, R. Nistri, D. Chiaramonti, Mass and energy balances of an autothermal pilot carbonization unit, *Biomass and Bioenergy.* 120 (2019) 144–155. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.009>.
- [21] A. Dufourny, L. Van De Steene, G. Humbert, D. Guibal, L. Martin, J. Blin, Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 137 (2019) 1–13. doi:10.1016/j.jaap.2018.10.013.
- [22] S. Sangsuk, S. Suebsiri, P. Puakhom, The metal kiln with heat distribution pipes for high quality charcoal and wood vinegar production, *Energy Sustain. Dev.* 47 (2018) 149–157. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.10.002>.
- [23] W.W. Ayass, H. Kobeissi, R. Mokdad, E. Shammass, Process Design and Operation of a Wood Charcoal Retort, *Waste and Biomass Valorization.* 9 (2018) 2211–2220. doi:10.1007/s12649-017-9978-x.
- [24] J.S.A.H.A.L.I. De Marco, From woody biomass waste to biocoke : influence of the proportion of different tree components, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 75 (2017) 485–497. doi:10.1007/s00107-016-1089-z.
- [25] P. Payakkawan, S. Areejit, P. Sooraksa, Design, fabrication and operation of continuous microwave biomass carbonization system, *Renew. Energy.* 66 (2014) 49–55. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.042>.
- [26] C. Syred, A.J. Griffiths, N. Syred, D. Beedie, D. James, A clean, efficient system for producing Charcoal, *Heat and Power (CHaP), Fuel.* 85 (2006) 1566–1578.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.10.026>.

[27] A. Saravanakumar, T.M. Haridasan, R.K. Bai, Technical and feasibility study of conversion of long-stick wood to charcoal in a partial combustion metal kiln, *Energy Sustain. Dev.* 10 (2006) 17–25. doi:[https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60540-2](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60540-2).

APÊNDICE

Apêndice A - Resultado da seleção de artigos sobre tecnologias de carbonização na produção de carvão vegetal, conforme etapas 07 do *Methodi Ordinatio*.

Ranking	Artigo	Revista	FI	Ano	Ci	InOrdinatio
1	Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis	Progress in Energy and Combustion Science	26,467	2008	1343	1338
2	Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass	Energy Conversion and Management	7,181	2010	745	750
3	Microwave heating processes involving carbon materials	Fuel Processing Technology	4,507	2010	641	646
4	Biorefineries: Current activities and future developments	Energy Conversion and Management	7,181	2009	419	419
5	Recent advances in biomass pretreatment – Torrefaction fundamentals and technology	Renewable and Sustainable Energy Reviews	10,556	2011	365	375
6	Pyrolysis, a promising route for biomass utilization	Bioresource Technology	6,669	1992	364	279
7	Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating	Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	3,470	2004	292	267
8	Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review	Analytica Chimica Acta	5,256	2009	250	250
9	A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass	Renewable Energy	5,439	2018	156	201
10	Thermo chemical conversion of biomass – Eco friendly energy routes	Renewable and Sustainable Energy Reviews	10,556	2012	161	176
11	Combustion and gasification of coals in fixed-beds	Progress in Energy and Combustion Science	26,467	1993	204	124
12	A review of thermal–chemical conversion of lignocellulosic biomass in China	Biotechnology Advances	12,831	2012	107	122
13	Dispelling common misconceptions to improve attitudes and policy outlook on	Energy for Sustainable Development	3,307	2013	100	120

Ranking	Artigo	Revista	FI	Ano	Ci	InOrdinatio
	charcoal in developing countries					
14	Improved and more environmentally friendly charcoal production system using a low-cost retort-kiln (Eco-charcoal)	Renewable Energy	5,439	2009	94	94
15	Evaluating the cost-effectiveness of global biochar mitigation potential	Biomass and Bioenergy	3,537	2010	89	94
16	Extensive review of the opportunities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes	Journal of Cleaner Production	6395,000	2017	47	93
17	Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities	Renewable and Sustainable Energy Reviews	10,556	2016	56	91
18	The potential for renewable energy in industrial applications	Renewable and Sustainable Energy Reviews	10,556	2012	68	83
19	Innovation in charcoal production: A comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil	Energy for Sustainable Development	3,307	2013	62	82
20	Bioreducer use in Finnish blast furnace ironmaking – Analysis of CO ₂ emission reduction potential and mitigation cost	Applied Energy	8,426	2014	51	76
21	Study of commercial wood charcoals for the preparation of carbon adsorbents	Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	3,470	2006	88	73
22	A review of high temperature solar driven reactor technology: 25years of experience in research and development at the Paul Scherrer Institute	Applied Energy	8,426	2017	31	71
23	Application of biomass pyrolytic polygeneration technology using retort reactors	Bioresource Technology	6,669	2016	33	68
24	A technical review on semi-continuous and continuous pyrolysis process of biomass to bio-oil	Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	3,470	2018	23	68

Ranking	Artigo	Revista	FI	Ano	Ci	InOrdinatio
25	Charcoal from agricultural residues as alternative reducing agent in metal recycling	Biomass and Bioenergy	3,537	2012	51	66
26	Use of biomass in integrated steelmaking – Status quo, future needs and comparison to other low-CO ₂ steel production technologies	Applied Energy	8,426	2018	17	62
27	Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy	Renewable and Sustainable Energy Reviews	10,556	2008	65	60
28	Pyrolysis gases burners: Sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity	Renewable and Sustainable Energy Reviews	10,556	2017	19	59
29	The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions	Progress in Energy and Combustion Science	26,467	2019	8	58
30	Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach	Fuel Processing Technology	4,507	2011	47	57
31	Integrated process of lignocellulosic biomass torrefaction and pyrolysis for upgrading bio-oil production: A state-of-the-art review	Renewable and Sustainable Energy Reviews	10,556	2019	4	54
32	Greenhouse gas emissions of a biomass-based pyrolysis plant in China	Renewable and Sustainable Energy Reviews	10,556	2016	18	53
33	Development of Low-Emission Integrated Steelmaking Process	Journal of Sustainable Metallurgy	0,000	2015	23	53
34	Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent	Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	3,470	2019	2	52
35	Mass and energy balances of an autothermal pilot carbonization unit	Biomass and Bioenergy	3,537	2019	1	51

Ranking	Artigo	Revista	FI	Ano	Ci	InOrdinatio
36	Modeling climate change mitigation from alternative methods of charcoal production in Kenya	Biomass and Bioenergy	3,537	2009	51	51
37	Technological prospecting in the production of charcoal: A patent study	Renewable and Sustainable Energy Reviews	10,556	2019	0	50
38	Valorization of eucalyptus urograndis wood via carbonization: Product yields and characterization	Energy	5,537	2019	0	50
39	Changes in commercial wood charcoals by thermal treatments	Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	3,470	2007	59	49
40	From woody biomass waste to biocoke : influence of the proportion of different tree components	European Journal of Wood and Wood Products	1,901	2017	9	49
41	Electricity generation from pyrolysis gas produced in charcoal manufacture: Technical and economic analysis	Journal of Cleaner Production	6,395	2018	3	48
42	SOLAR THERMOCHEMICAL CONVERSION OF BIOMASS	Solar Energy	4,674	1999	97	47
43	Upgrading of carbon-based reductants from biomass pyrolysis under pressure	Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	3,470	2016	11	46
44	Comparative Study of Local Tunisian Woods Properties and the Respective Qualities of Their Charcoals Produced by a New Industrial Eco-Friendly Carbonization Process	Waste and Biomass Valorization	2,358	2018	1	46
45	Thermal inertia effects of the structural elements in heat losses during the charcoal production in brick kilns	Fuel	5,128	2018	0	45
46	The metal kiln with heat distribution pipes for high quality charcoal and wood vinegar production	Energy for Sustainable Development	3,307	2018	0	45
47	Process Design and Operation of a Wood Charcoal Retort	Waste and Biomass Valorization	2,358	2018	0	45

Ranking	Artigo	Revista	FI	Ano	Ci	InOrdinatio
48	Effect of environmental exposure on charcoal density and porosity in a boreal forest	Science of The Total Environment	5,589	2017	4	44
49	A clean, efficient system for producing Charcoal, Heat and Power (CHaP)	Fuel	5,128	2006	59	44
50	A new technology for the combined production of charcoal and electricity through cogeneration	Biomass and Bioenergy	3,537	2014	17	42
51	Cogenerating electricity from charcoaling: A promising new advanced technology	Energy for Sustainable Development	3,307	2013	22	42
52	Design, fabrication and operation of continuous microwave biomass carbonization system	Renewable Energy	5,439	2014	16	41
53	The iron industry energy transition	Energy Policy	4,880	2012	25	40
54	Carbon neutral merchant pig iron in Brazil: Alternatives that allow decoupling from deforestation	Energy for Sustainable Development	3,307	2015	4	34
55	Analysis of volatile organic compounds in polyurethane coatings based on Eucalyptus sp. bio-oil pitch using comprehensive two-dimensional gas chromatography (GC×GC)	Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	3,470	2010	25	30
56	Design of Semi-static Solar Concentrator for Charcoal Production	Energy Procedia		2014	5	30
57	Time/temperature combustion profiles of various wood-based biofuels	Biomass and Bioenergy	3,537	2012	12	27
58	Charcoal from biomass residues of a Cryptomeria plantation and analysis of its carbon fixation benefit in Taiwan	Biomass and Bioenergy	3,537	2009	26	26
59	Development of a high yield and low cycle time biomass char production system	Fuel Processing Technology	4,507	2006	39	24
60	Fast pyrolysis of biomass	Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	3,470	1984	137	12
61	An evaluation of the mound kiln carbonization technique	Biomass and Bioenergy	3,537	1998	50	-5

Ranking	Artigo	Revista	FI	Ano	Ci	InOrdinatio
62	Technical and feasibility study of conversion of long-stick wood to charcoal in a partial combustion metal kiln	Energy for Sustainable Development	3,307	2006	10	-5
63	Utilization of wood wastes in Nigeria: a feasibility overview	Technovation	5,250	2001	18	-22
64	Wood-to-charcoal conversion in a partial-combustion kiln: an experimental study to understand and upgrade the process	Fuel	5,128	1992	15	-70
65	Carbonization of some fast-growing species in Sudan	Applied Energy	8,426	1993	9	-71
66	Evaluation of usher wood and karkadeh stem for charcoal in Sudan	Biomass and Bioenergy	3,537	1993	2	-78
67	A review of fuel production from wood residues	Energy	5,537	1993	1	-79
68	Carbonization of wood: Product analysis and energy assessment	Applied Energy	8,426	1989	8	-92
69	Pyrolysis of large wood samples	Applied Energy	8,426	1984	23	-102
70	Yield and quality of charcoal from coconut stem wood	Biomass	3,537	1988	3	-102

Capítulo 4



10.37423/220305574

USINAGEM NÃO TRADICIONAL: JATO ABRASIVO

Julia Pereira Manenti

*Instituto Federal de Santa Catarina - Campus
Criciúma*

Maxsuel Cruz Teixeira

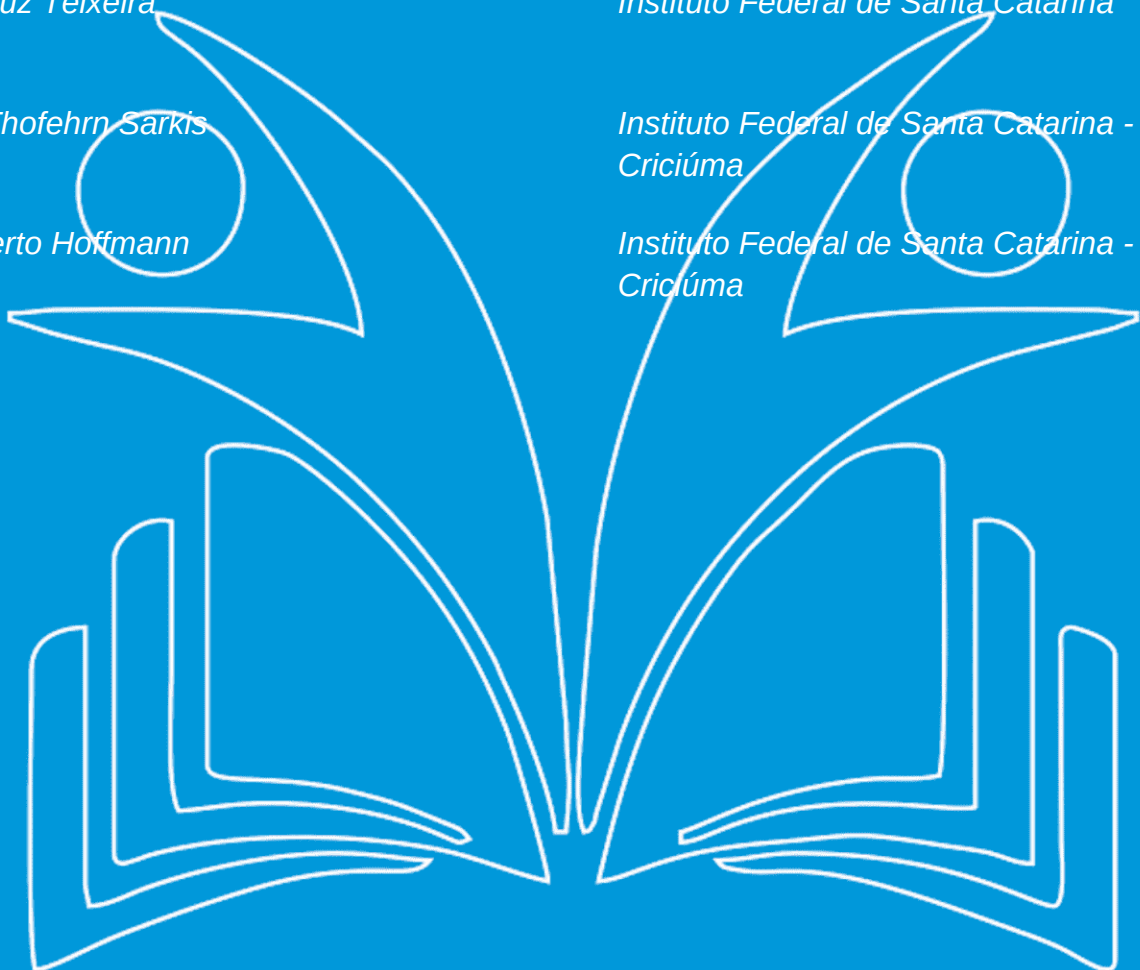
Instituto Federal de Santa Catarina

Leonardo Thofehr Sarkis

*Instituto Federal de Santa Catarina - Campus
Criciúma*

Paulo Roberto Hoffmann

*Instituto Federal de Santa Catarina - Campus
Criciúma*



Resumo: Este artigo visa trazer uma releitura e discussão acerca da usinagem não convencional por jato abrasivo, que consiste em remoção de material através do lançamento de partículas abrasivas com determinada pressão. O processo tem características específicas apresentando vantagens e desvantagens variando de acordo com os objetivos que o projetista necessita. A área mecânica é onde há mais procura, principalmente para melhores acabamentos. Mostrando a história, o processo, as características, a importância da segurança do jatista e os principais usos deste processo não convencional, o artigo é embasado em diferentes referências bibliográficas, fazendo uma releitura e descrição do processo em uma visão abrangente do meio em que é inserido.

Palavras-chave: Jato Abrasivo, usinagem.

1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de propiciar conforto e realizar operações para sobrevivência, o ser humano criou e modelou objetos desde a pré-história. Com o descobrimento de materiais mais modeláveis na Idade do Metais (aproximadamente de 3.300 a.C. – 1000 a.C.), o homem começou a afeiçoá-lo com o intuito de obter os formatos desejados, uma tecnologia simples como uma flecha para caçar de muito foi útil para o desenvolvimento.

Com o passar do tempo a usinagem, de acordo com Groover (2010), consiste em um processo ferramental de corte utilizado para cortar um material e deixá-lo do formato da peça desejada, normalmente envolvendo deformação de cisalhamento para formar cavacos, foi tornando-se cada vez mais importante e necessário. No século XIX iniciam-se os primeiros estudos a fundo sobre o processo e hoje de variados tipos encontram-se no mercado.

Separados em convencionais (como torneamento, fresamento, furação, aplainamento, mangrilamento e retificação) e os não convencionais (como o jato d'água, eletroquímica, eletroerosão, feixe de elétrons, laser, plasma e jato abrasivo) que exigem um maquinário associado e variado como tornos, fresadoras, jatos, retificadoras e furadeiras, mostrando que por trás de um conceito simples, há um trabalho complexo.

Nas últimas décadas a crescente procura e desenvolvimento de tecnologias que auxiliem e aperfeiçoem com mais facilidade, precisão e menor custo vêm se tornando uma ferramenta importante para as empresas manter-se no mercado. Com o objetivo de maximização de produção e minimização de custos e prejuízos aliados a produção, pesquisas desenvolveram maquinários eficientes e tecnológicos, como as máquinas CNC (Computer Numerical Control), utilizado nas etapas finais de um projeto, projeto assistido por computador (CAD – Computer Aided Design), normalmente utilizado como primeira etapa de uma peça.

Com o intuito de ampliar os maquinários já existentes aumentando a praticidade e os fatores anteriormente citados, o jato abrasivo para usinagem vem ao mercado com o objetivo de usinar peças com maior precisão e velocidade, garantindo-a um bom dimensionamento.

Este artigo tem o objetivo de fazer uma ampla releitura e pensamento sobre o processo de usinagem por jato abrasivo, mostrando sua história, vantagens e desvantagens e as aplicações associadas.

2 METODOLOGIA

Com objetivo da criação e elaboração do artigo foi feita uma vasta releitura de livros e outros artigos com referências acadêmicas confiáveis para poder trazer a discussão em torno da usinagem por jato abrasivo, seguindo as seguintes etapas:

- a) Aquisição de conhecimentos que compõem desde a história ao objetivo do maquinário em que a obra se refere;
- b) Realização de pesquisas bibliográficas sobre a usinagem e a usinagem por jato abrasivo;
- c) Redação dos elementos componentes no processo de usinagem por jato abrasivo; e
- d) Redação do artigo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 HISTÓRIA

O estadunidense Benjamin Tilghman (1821 – 1901) foi o desenvolvedor da máquina de jato abrasivo em 1870. A ideia surgiu ao ver a intensidade dos ventos de areia no deserto e inicialmente foi utilizada apenas para remoção de ferrugens. Poucos anos depois, em 1904, Thomas Pangborn contribuiu para o desenvolvimento do jato, fazendo mudanças no maquinário e tornando-o útil para gravar ou desenhar em peças, como escrituras de túmulos.

O problema apresentado na época foi a doença silicose, que ocorria com a aspiração de areia, já que não se utilizava equipamentos adequados as partículas alojavam-se nos pulmões causando graves dificuldades respiratórias.

Ao passar de 35 anos, várias outras contribuições foram feitas para o desenvolvimento deste tipo de usinagem, chegando em 1937 com o uso do aparelho em larga escala, não utilizando mais areia como abrasivo, e utilizando a aparelhagem para decorar e dar um bom acabamento a cerâmicas, vidros e alguns metais.

Com a evolução desta ideia, o jato de partículas abrasivas evoluiu e começou a ser proveitoso para criar formas mais complexas e permitindo aos usuários conseguirem cortes mais rápidos, aumentando o número ou a velocidade das partículas.

De acordo com os engenheiros Bhaskar Chandra e Jagtar Singh (2011) o processo de usinagem abrasiva consiste na remoção de material de uma peça usando uma grande quantidade de pequenas partículas

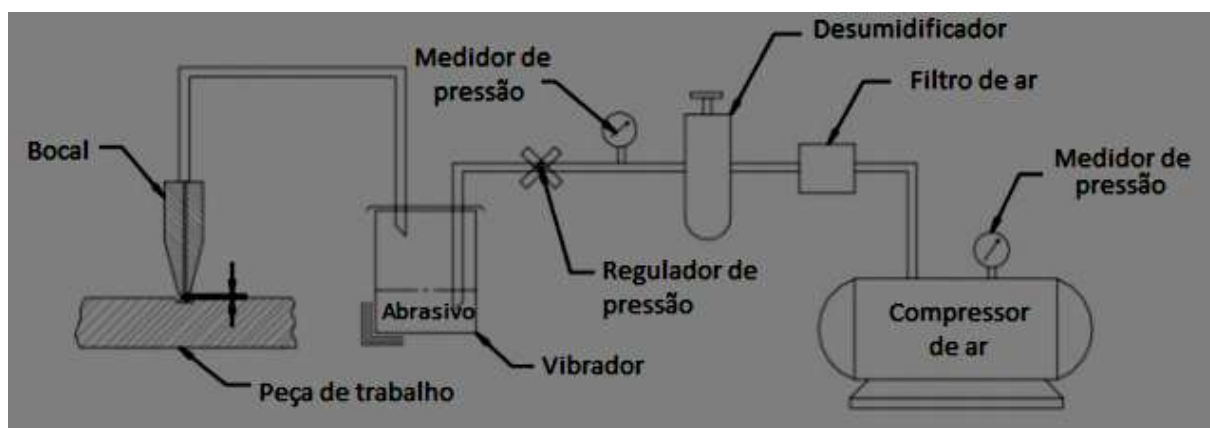
abrasivas. O objetivo deste processo é obter um dimensionamento mais preciso e dar melhor acabamento superficial comparado a outros processos de usinagem.

Sendo considerado eficaz para materiais duros e frágeis sua utilidade é de suma necessidades nas indústrias ao levar-se em consideração a quantidade de materiais com esse perfil no mercado. Para isso, a sua aparelhagem deve seguir alguns itens e aspectos para chegar-se ao resultado requerido.

3.2 APARELHAGEM E PROCESSO

O maquinário necessário é chamado de jato abrasivo, que consiste em uma câmara vibratória de gás comprimido contendo pó abrasivo; um pequeno bocal; um regulador de pressão; um desumidificador de ar; um filtro de ar; um medidor de pressão no compressor de ar. Como mostra a figura abaixo.

Figura 01: Desenho esquemático do jato abrasivo.



Fonte: A Study of effect of Process Parameters of Abrasive jet machining.

O gás, ao sair do compressor de ar, passa pelo filtro e pelo desumidificador chegando à câmara de vibração que contém pó abrasivo a uma pressão aproximada de 8 kg/cm². Com isso, a mistura de ar comprimido com as partículas abrasivas no vibrador é diretamente lançada através de um bocal, em alta velocidade, sob a peça de trabalho.

Por conter milhares de partículas de milimétricas a nanométricas o processo não é permitido em locais pequenos ou fechados sem o uso de um sistema de exaustor que contribui para a saúde e segurança de quem o manuseia.

3.3 VARIÁVEIS NO PROCESSO

Visualiza-se na Figura 01 a quantidade de equipamentos existentes para fazer medição e averiguação de variáveis existentes durante o processo dentro do maquinário, elas são:

- a) Tipo de gás utilizado;
- b) Tipo do abrasivo;
- c) Tamanho dos grãos;
- d) Velocidade;
- e) Fluxo;
- f) Material da peça;
- g) Geometria do bocal;
- h) Distância de trabalho; e
- i) Formato da peça desejada.

Estas variáveis influenciam na característica final do produto requerido. Se forem mal controladas ou utilizadas de maneira errônea, a qualidade final do produto não será atingida como deveria, prejudicando, assim, o objetivo do uso de tal maquinário.

“Abrasivos típicos utilizados em usinagem por jato abrasivo incluem óxido de alumínio (para alumínio e latão), carboneto de silício (para aço inoxidável e cerâmica) e esferas de vidro (para polir). Os tamanhos de grão são pequenos, 15 a 40 μm (0,0006 a 0,0016 pol.) de diâmetro, e devem ser uniformes em tamanho para uma determinada aplicação. É importante não reciclar os abrasivos porque grãos usados se tornam fraturados (e, portanto, menores em tamanho), desgastados e contaminados”. (Groover, 2010, p. 632, tradução autoral).

Há inúmeras características que afetam as variáveis no processo de usinagem por jato abrasivo. O material que será usinado, o tipo e tamanho das partículas abrasivas são exemplos, e cada uma com sua importância associada. Para visualizá-las de uma melhor maneira a Tabela 1 foi inserida abaixo.

Tabela 01: Características dos processos abrasivos.

Material da peça	Materiais duros e quebradiços
Tipo do abrasivo	Al_2O_3 , SiC, pó de vidro
Tamanho do abrasivo	Em torno de 25 micrômetros
Vazão	2 a 20 g/min
Meio	N_2 , CO_2 ou ar
Velocidade	125 a 300 m/s
Pressão	2 a 8 kg/cm^2
Material do bocal	Carboneto de tungstênio ou safira sintética
Folga da ponta do bico	0,25 mm a 15 mm
Tolerância	$\pm 0,05$ mm
Operação de usinagem	Perfuração, rebarbação, limpeza
Vida do bico	Carboneto de tungstênio – 12 horas Safira – 300 horas

Fonte: *Unconventional Machining Process* (tradução autoral).

3.4 UTILIZAÇÃO

Na área de mecânica a necessidade de remover material de peças duras e enrijecidas e de difícil alcance é comum. O jato abrasivo, por conter partículas soltas faz com que a capacidade de alcance desta aparelhagem aumente e devido à pressão que as partículas saem pelo bocal faz com que haja uma alta força de impacto, podendo ser utilizado em cortes rasos em materiais cerâmicos, cortes em metais como o alumínio, cavidades para sensores de pressão e remoção de cola ou tinta de certos objetos, além de algumas aplicações mais específicas, como matrizes para microprocessadores e valas para aplicações micro medicinais.

3.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS

O processo de jateamento abrasivo pode ser utilizado para fazer buracos em materiais duros, frágeis e sensíveis ao calor, fazendo com que seja útil em uma gama de setores, como por exemplo, em trabalho com vidros. Além disso, não há dano na microestrutura do material pois não é gerado calor no processo, minimizando mais perda de custos, já que o processo em si tem baixo custo de capital. O bom acabamento superficial é um ponto em destaque neste processo, já que a rugosidades superficial varia de 0,1 a 1,5 micrometro de acordo com o tipo de abrasivo utilizado.

Em contrapartida, o uso deste tipo de usinagem é limitado pois há baixa taxa de remoção de material e os grânulos do pó abrasivo podem acumular-se no bocal ou incorporar-se a peça devido ao tamanho reduzido e a velocidade que são lançados.

Por razão da velocidade do jato, furos cegos não são recomendados pois podem acarretar em problemas no material, e há necessidade de utilização de proteção pois há dispersão do material ao colidir com a peça.

3.6 SEGURANÇA

Os principais itens recomendados a serem utilizados pelo jatista, de segurança pessoal, são: o uso do capacete com vidro temperado e saída traseira para uma mangueira de ar; condicionador de ar do capacete; luvas de raspa e/ou luva do jatista (gabinete); e blusa (com gola alta junto a traqueia) e calça, ambas com material leve e resistente. Além destes, recomenda-se seguir as normas, como a utilização do controle de acionamento do jato a distância, evitando aproximar-se do bocal de saída do jato, e de sapatos fechados e altos, como botas de couro raspa.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sete grandes aspectos foram avaliados sobre o jato abrasivo: sua história, maquinário necessário, variáveis no processo, utilização, segurança, vantagens e desvantagens. Conclui-se que tal método é um processo relativamente novo ao compará-lo a outros, e requer certo maquinário assim como um bom preparo do jatista, para garantir a segurança e a correta utilização do jato abrasivo, diante de suas diversas variáveis, as quais podem resultar em defeitos no produto final. Hoje há uma gama muito diversificada de processos de usinagem, e é evidente que o jato abrasivo não é um dos mais populares, porém há situações em que ele se destaca como sendo o processo mais vantajoso.

Sabendo da sua crescente busca desde o século XVIII, podemos concluir que devido a sua já existente ótima performance unida ao fato da evolução de softwares e da tecnologia em geral, de forma a minimizar custos, riscos, investimentos e aumentar a área de aplicação do processo confirma que a usinagem por jato abrasivo vem crescendo cada vez mais e continua em expansão no mercado, com ótimas projeções para o futuro.

REFERÊNCIAS

CHANDRA, B. Et al. A Study of Process Parameters of Abrasive jet machining. Volume 3, nº 1. 2011

GROOVER, M. Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, process and systems. Edição 4. John Wiley & Sons, 2010.

JAGADEESHA, T. Unconventional Machining Process. I. K. International Publoshing House Pvt. Ltd, 2016.

MISHRA, P. Nonconventional Machining. Narosa Publishing House, 2007.

PRASAD PRADHAN, K. Design and Fabrication of Abrasive Jet Machine. 2009. 59f. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Mecânica no Instituto Nacional de Tecnologia Rourkela – Índia.

VIIJAY, K. Advanced Machining Processes. Allied Publishers Private Limited, 2007.

Capítulo 5



10.37423/220305587

A INTEGRAÇÃO DE COR E LUZ NA ARQUITETURA AMBIENTAL, UMA QUESTÃO DE SUSTENTABILIDADE

Maria da Purificação Teixeira

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Paulo Cirrota

Universidade Federal do Rio de Janeiro



Resumo: Este trabalho pretende tecer algumas considerações relativas aos aspectos da integração de cor e luz, empregados nos projetos de arquitetura como elementos de sustentabilidade determinantes, na geração de uma eficiente Arquitetura Ambiental. Cor e luz são destacados no estudo, considerando o entendimento da necessidade da adequação ambiental e bioclimática constituírem-se em um dos aspectos fundamentais para a concepção arquitetônica, tanto quanto, tomando como princípio, as características climáticas do Brasil, principalmente, no que diz respeito à presença de luminosidade natural e incidência da radiação solar em grande parte do ciclo anual, onde se sugere o seu aproveitamento de forma mais otimizada quando conjugado com o uso da cor. A metodologia adotada procura correlacionar os conceitos de eficiência energética, preservação ambiental e conforto ambiental, dentro da abordagem do desenvolvimento sustentável focalizado no clima dos trópicos, tanto quanto, valorizar os aspectos estéticos e psicológicos do uso da cor e da luz, na qualidade de elementos integrantes da sustentabilidade de um projeto arquitetônico para as regiões tropicais, e, desta forma, estabelecer maior juízo de valor para este binômio, face à esta natural realidade bioclimática associada à particular relação de espontaneidade com o uso da cor, que caracteriza, culturalmente, uma boa parte dos países dos trópicos. A partir destas considerações, destacam-se algumas variáveis no emprego do binômio luz e cor, na metodologia de cálculo e no emprego de equipamento, para o desenvolvimento de projetos de arquitetura eficientes sob o ponto de vista energético e de convivência humana, tanto quanto, se estabelece uma relação conceitual importante entre este binômio e os aspectos de preservação ambiental e a conseqüente prática de uma Arquitetura Ambientalmente Correta e Sustentável.

1. INTRODUÇÃO

Muito já se tem dito sobre “desenvolvimento sustentável” e, em quase todas as regiões do planeta, em algumas mais do que em outras, vimos testemunhando os indicadores de que este olhar necessita de uma especial atenção: expansão desordenada de cidades à custa de aglomeração e desestruturação urbana e rural, desflorestamento e desertificação, destruição maciça de preciosas jazidas de metais em bruto, resíduos perigosos e milhares de produtos químicos tóxicos comprometendo a qualidade do ar, águas, solo e, conseqüentemente, a saúde das populações que compartilham estes habitats; aumento de ruído ambiente, comprometimento dos recursos hídricos, enfim, o próprio desconhecimento do ser humano com relação ao seu particular relacionamento, como espécie, com o meio ambiente. De acordo com SANTOS (1997), esta transformação da natureza pelo trabalho humano, criou, ao longo dos séculos, novas formas ou objetos culturais, artificiais, históricos, que resultam numa sucessão de formas crescentemente complexas, num processo de “humanização” que atinge escala planetária e nos coloca diante da quase inexistência da “paisagem natural”. Tal estado de coisas permite à sociedade refletir sobre a necessidade da prática de uma arquitetura ambientalmente correta e sustentável, ou seja, mais sintonizada com as condicionantes bioclimáticas e com o acervo paisagístico e ambiental de uma determinada região.

Neste entendimento, de acordo com TEIXEIRA (2004), parece indispensável, pois, neste especial momento, observar-se que à medida que a espécie humana veio incorporando suas forças à natureza trabalhada, esta foi adquirindo novos contornos, novas silhuetas e foi, sobremaneira, se incorporando de uma nova qualidade social, refletindo a cada interferência, novos valores de uso do próprio espaço construído e do ambiente gerado, expressos na qualidade, quantidade e variedade dos recursos naturais disponíveis em uma determinada parte do espaço terrestre.

Desta sorte, o objetivo primeiro deste trabalho é destacar a importância do binômio cor-luz em projetos arquitetônicos, particularmente nos países dos trópicos, tanto quanto, qualificar a integração destes dois elementos como um fator de sustentabilidade a ser considerado na análise e concepção bioclimática. Para atender a este aspecto, considerou-se a luminosidade natural e a incidência da radiação solar em regiões de clima tropical, o que permite qualificar a luz natural e o emprego dirigido da cor, tanto quanto o uso da iluminação artificial integrada, como fatores que influenciam a sensação de conforto térmico dos ocupantes, concorrendo para criação de ambientes mais eficientes do ponto de vista energético, e para otimização de aspectos físicos, culturais e psicológicos que favoreçam o conforto visual.

Neste particular aspecto, foi destacada o emprego da cor na arquitetura brasileira, que de acordo com os estudos de SILVA (1995), é o resultado do confronto de três elementos étnicos (o negro, o índio e o branco), que fez surgir um gosto estético que se distancia cada vez mais do gosto de cada grupo de origem, gerando um gosto mestiço, bastante original pela diferenciação dos gostos dos demais povos. E neste entendimento, cabe ressaltar o que esclarecem MARCONI e PRESOTTO (2001), quando apontam que a economia depende do grau de conhecimento tecnológico, que pode limitar a capacidade de produção, mas todas as sociedades desenvolvem, pelo menos as técnicas mínimas para a sobrevivência. Independente de quais técnicas estejam sendo utilizadas, o fato incontestável, é que, desde as sociedades primitivas até às atuais sociedades industriais, encontraram nomeio ambiente, os recursos necessários para, de acordo com a população e com a cultura existentes, configurar os fatores intervenientes dos seus processos de subsistência e/ou desenvolvimento.

Focando, pois, o uso da cor e da luz na produção arquitetônica brasileira, à luz deste enfoque sustentável, havemos de considerar os desdobramentos culturais, psicológicos e sociais, decorrentes desta nossa particular etnia.

Outro objetivo é propor diretrizes de projeto, levando-se em conta as diferenças decorrentes do uso da iluminação natural no período diurno e de iluminação artificial no período noturno, e as suas influências na percepção das cores. A falta de percepção dessas diferenças de iluminação são aqui consideradas como causa de deficiência de projeto e como condicionante de sustentabilidade no emprego deste binômio, particularmente nas regiões tropicais.

2. LUZ E COR NOS TRÓPICOS, UMA QUESTÃO DE SUSTENTABILIDADE

Em estudos recentes, curvas teóricas de insolação durante um ano, para latitudes de 0° a 45°, estabelecendo uma relação com a disponibilidade da energia solar incidente, demonstraram que os países que estão situados entre as latitudes de 32° N e 32° S conseguem aproveitar até cerca de 84% da energia solar incidente, quando considerados a) a orientação dos diferentes planos de incidência, e, b) a quantidade de radiação recebida no período; curiosamente, a faixa de latitude onde se encontram os chamados países dos trópicos, ou países do terceiro mundo (GOMES, 1967).

Neste entendimento, o Sol é a fonte natural de energia que nos fornece luz e calor, influencia o clima e é responsável pelos grandes ciclos que impulsionam a vida em nosso planeta. O Sol, como fonte de energia, vem sendo utilizado pelo homem desde os tempos pré-históricos, quando inicialmente foi empregado para secar e preservar o alimento. Nos últimos milhões de anos, todos os nossos alimentos

e combustíveis são possíveis pela ação do Sol através da interação de fotossíntese e o armazenamento nas plantas e matéria orgânica. É fato que sem esta energia proveniente do Sol, o homem não poderia sobreviver.

Atualmente, reconhecemos no Sol, a origem de todas as fontes de energia empregadas pelo homem, proporcionando a condição necessária para a manutenção do ciclo da água, alimento e força, a praticamente todas as formas de vida. A energia irradiada pelo Sol é imensa e está sendo constantemente renovada.

A energia solar é recebida sob diferentes comprimentos de onda, conforme relata BRAGA et al (2002), e a luz que vemos representa uma parte desta energia, correspondendo em um dia claro, a uma composição de aproximadamente 45% da energia que chega na superfície da Terra, compreendendo o espectro visível, incluindo comprimentos de onda que variam de 0,4 a 0,7 μm . O restante da radiação incidente sobre a superfície da Terra é constituído por raios ultra-violetas com comprimento de onda menor que 0,3 μm , num percentual de cerca de 10% da radiação total e; raios infra-vermelhos com comprimento de onda superior a 0,76 μm , num percentual de cerca de 45%.

Esta radiação se propaga na velocidade da luz sob a forma de ondas eletromagnéticas, que atingem a atmosfera terrestre com uma intensidade de 1353 W/m², que têm a sua intensidade atenuada quando chega ao solo terrestre, em razão a) dos fenômenos de difusão, absorção e reflexão dos raios solares, tanto quanto, das condicionantes de sua própria trajetória pela atmosfera, no que diz respeito b) à posição na Terra: às condições da camada atmosférica de lugar para lugar, da latitude e altitude do local; c) ao momento em que é observada: hora do dia, época do ano; e, d) condições climáticas do local: grau de umidade e de poluição, presença de nuvens, etc.

No que se refere à superfície terrestre, esta não esquentam nem resfria de modo uniforme. E de acordo com VIEIRA (1994), a radiação solar pode ser absorvida, transmitida ou refletida, sendo o fluxo incidente (cerca de 47% da radiação total que atravessa a biosfera), igual a soma dos fluxos absorvidos, transmitidos e refletidos pela superfície da crosta terrestre. Ao considerar-se que cerca de 47% da radiação incidente atinge a superfície da terra e/ou corpos de água nela existentes e, ao considerar-se ainda que a forma como estas superfícies são tratadas se reflete na forma como a cor é percebida na paisagem das cidades, e que este mecanismo tem relação com o clima e o comportamento humano de uma determinada região, e porque não dizer de um determinado ecossistema natural, é possível que se comece a vislumbrar o estudo das características do binômio cor x luz, também como sendo

uma abordagem necessária ao exercício profissional de arquitetos, planejadores e gestores do ambiente construído.

2.1. COR E LUZ NA PRODUÇÃO ARQUITETÔNICA SUSTENTÁVEL

OLIVEIRA (1985), em sua metodologia para análise dos atributos bioclimatizantes da forma urbana, releva que a forma urbana e as atividades nela praticadas, introduzem modificações no clima urbano que comparado ao clima de seu entorno, demonstra ser, particularmente, diferenciado desse. Neste contexto, na análise do sítio urbano, as variáveis do relevo topográfico, tanto quanto, a análise da vegetação e da permeabilidade dos terrenos; dão a nota de que a forma desordenada na distribuição das edificações, conduzem por criar um micro- clima diferenciado no sítio das ocupações, que se distancia muito das condições ideais de aproveitamento sustentável da radiação solar. E quando se considera disponibilidade, em quantidade e em continuidade, desta radiação na região dos trópicos, parece de extrema urgência, incluir, de forma generalizada, na prática da Arquitetura e das Cidades Ambientalmente Corretas, a avaliação das condições de reflexão, transmissão e absorção desta radiação quando atinge o solo e as superfícies das edificações, não apenas no que se refere à uma abordagem térmica, mas também no que resulta em conforto visual.

Segundo Rapoport (1972), os construtores da arquitetura nativa não puderam ignorar as forças da natureza e viver em ambientes fechados e aclimatados; ao contrário, sempre tiveram uma grande sensibilidade para com os problemas climáticos e conseguiram elaborar espaços adaptados ao clima, utilizando o mínimo de recursos tecnológicos, a partir de um conhecimento detalhado das formas, dos materiais e do microclima da região, de forma a melhor orientar o grupo de edificações. Ao que parece, em um certo nível, praticavam o que hoje define- se como Bioclimatismo.

De acordo com RIBEIRO (1998), a atual civilização, principalmente no que se refere à ocidental e industrial, tem demonstrado, nas últimas décadas, indicadores sempre ascendentes como as taxas de crescimento populacional associadas ao processo de urbanização, ao consumo de energia, à demanda de alimentos e geração de resíduos, a invenções, descobertas e comunicações associadas ao conceito de desenvolvimento. A considerar esta crescente necessidade de fazer frente às prerrogativas do desenvolvimento sustentável e do resgate e atualização da arquitetura bioclimática, parece cada vez mais necessária uma valorização dos conhecimentos e tecnologias relacionados com o uso eficiente da radiação solar, muito particularmente, nas regiões em que ela se apresenta abundante em

intensidade e luminosidade, tanto quanto, do uso racional e otimizado da iluminação artificial quando integrada à luminosidade natural.

2.2. O BRASIL, UM PAÍS DOS TRÓPICOS

Sabemos que os trópicos são os paralelos cuja latitude é igual à declinação máxima do Sol, constituindo-se nos limites da zona em que o Sol pode passar pelo zênite. Ora, este dado é fundamental para o entendimento da importância que a incidência dos raios solares desempenha nestas latitudes, uma vez que o aquecimento produzido é proporcional ao ângulo de incidência e a absorção pela atmosfera é tanto maior quanto menor o ângulo de altura solar. Esta localização especial entre as latitudes de 32°N e 32°S, faz do Brasil um país tipicamente dos trópicos, onde, numa abordagem genérica, ainda de acordo com RATTNER (1980), uma boa parte do território (92%), situada acima do trópico de capricórnio, distribui-se entre os climas equatorial e tropical, caracterizando uma zona tropical. O restante do território, compreende a região sul e o sul do estado de São Paulo, localizado na zona temperada.

Apesar de bastante diversificado, em suas diferentes regiões, o clima do Brasil, de modo geral, esta permanentemente sujeito a altas temperaturas, ao mesmo tempo em que possui uma elevada distribuição de precipitações pluviométricas em determinados períodos do ano, em decorrência do seu extenso litoral; o que faz desta característica tropical-úmida, um grande desafio para todos os profissionais envolvidos com qualidade de vida do ambiente construído e o desafio do conforto higrotérmico nestes ambientes, entendido de forma genérica, como uma sensação neutra de bem-estar com relação à temperatura e umidade.

Cabe pois, ressaltar a importância que assume para os países dos trópicos, técnicas, procedimentos e conhecimentos relacionados à aclimação dos ambientes e cultura particularizada, que permitam facilitar e atenuar as estratégias fisiológicas de dissipação de calor pelo corpo humano. Acrescentemos a este enfoque, que a radiação solar se converte em energia térmica, o que, para as regiões compreendidas entre os trópicos, indiscutivelmente, constitui-se numa abordagem prioritária quando a questão envolve conforto térmico, indissociável da percepção visual, já que o conforto ambiental se confere numa interação global do homem com o ambiente.

A considerar estes dados, o conhecimento sobre a radiação solar, excessiva nos lugares de clima tropical, é pois, fundamental para o arquiteto, na medida em que a edificação se converte para os indivíduos, em proteção da radiação do entorno e da solar. E aqui, relevamos, que esta grande

quantidade de radiação, além de converter-se facilmente em energia térmica, possui um enorme percentual (cerca de 50%) que é visível ao olho humano. A partir de comprimentos de onda incidentes, que são refletidos seletivamente, percebe-se diferentes cores, o que faz da edificação também um possível filtro para estas faixas de radiação.

2.3. A COR NA ARQUITETURA BRASILEIRA

Curiosamente, as culturas que se desenvolveram nesta faixa de latitudes dos trópicos, onde destacamos o Brasil e o México no continente americano e grande parte do continente africano, estabeleceram ao longo do tempo, uma relação espontânea e bastante despojada no emprego e o uso da cor (RATTNER, 1980). Uma relação que não se limita às expressões artísticas formais mas que se manifesta de forma ampla e variada em todos os segmentos de expressão destas sociedades, seja no tocante à produção de tecidos, artefatos e utensílios, seja no que se refere à produção arquitetônica e artística, a nível formal e informal.

Somos levados a considerar que possivelmente a flora e fauna diferenciada destes países, muito particularmente os situados no hemisfério sul, em razão da grande intensidade pluviométrica que os caracteriza, aliadas à exuberância de uma paisagem repleta de matizes e nuances, facilmente realçados pela intensa luminosidade que caracteriza estas regiões, parece ter colaborado para aproximar estas populações de uma natural identidade histórica e geográfica, com o emprego e a presença da cor em suas vidas e, feito talvez, destes países e destas culturas, verdadeiros sinalizadores para o resto do planeta, das incríveis possibilidades contidas no binômio cor- luz.

Com relação à produção arquitetônica brasileira, de acordo com SILVA (1995), no que diz respeito à arte indígena brasileira, esta tinha à sua disposição as mais variadas espécies de pássaros coloridos, e, praticando a arte de transformar a cor das penas dos pássaros (tapiragem), especialmente do papagaio, era possível manejar uma grande gama de cores, rica de tonalidades e variações naturais. Esta relação com a cor foi-se incorporando à colonização brasileira, onde os colonizadores de forma a catequizar os índios, procuraram não esquecer a sua cultura.

Desta sorte, a arquitetura colonial brasileira é conhecida por seu visual mágico e pela beleza inconfundível do jogo de suas cores, onde, na pintura das casas a cor branca foi muito empregada, porém, em geral, os detalhes como portas, janelas, beirais, e quaisquer outros ornamentos eram pintados com cores vibrantes como vermelho, azul e amarelo. Cabe ressaltar também a importância

que assumiram os azulejos portugueses, que apareciam tanto na decoração de igrejas como no interior das casas, e que podiam retratar tanto histórias bíblicas, como o trabalho dos escravos.

Ainda de acordo com os relatos de SILVA (1995), o século XIX herdou as tradições arquitetônicas e urbanísticas do período colonial, porém com um emprego diferenciado, pois cores mais fortes eram aplicadas nas fachadas. Elementos novos como escadas de ferro nas entradas, embasamentos e molduras de pedra ao redor das janelas, fizeram com que o emprego exclusivo da cor-pigmento desse lugar a uma composição entre a cor-pigmento e a cor desses materiais.

Desta sorte, até 1940, a industrialização dos materiais de construção era tímida, quase artesanal, mas com o avançar da difusão do Modernismo no Brasil, este quadro mudou bastante e, à medida que a indústria ia se aperfeiçoando, a tecnologia dos materiais também se aprimorava, e os arranha-céus foram abandonando as antigas formas e cada vez mais se tornando imensas torres de vidro e aço, concreto, granito e madeira, ficando dessa maneira, a cor das fachadas restrita praticamente à cor desses materiais, resultando, a face da cidade, num visual de variações de cinzas. Anúncios e letreiros tornaram-se elementos poderosos, relegando a arquitetura propriamente dita, a um plano neutro.

Diante da nova consciência de sustentabilidade, o respeito ao meio ambiente e ao aproveitamento das condicionantes bioclimáticas é colocado em questão, e a arquitetura, um espelho da sociedade, também vem se modificando, onde o uso da cor é um aspecto em que podemos notar tais mudanças em requintes de intensidade e tonalidades. Face a estas potencialidades, somos levados a acreditar que, possivelmente para os países dos trópicos, as possibilidades de utilização da cor e da luz possam ter aplicações infinitamente mais amplas das que as que temos até agora explorado e identificado, na medida em que começemos a considerar:

- a) a relação mais estreita e íntima que estas culturas tem estabelecido com as cores e com a sua presença permanente na natureza e paisagem ao redor,
- b) a espetacular disponibilidade de radiação solar visível e de luminosidade natural destas latitudes,
- c) os elevados percentuais de aproveitamento desta radiação, verificados ao longo de todo o ano, nestas regiões, e,
- d) as decorrentes possibilidades energéticas, estéticas, fisiológicas e psicológicas, de aproveitamento da iluminação artificial, quando integrada com o emprego da cor e luz natural.

Em verdade, considerando que os centros tropicais apresentam características próprias e ainda em fase de investigação pelas diferenciadas ciências que abordam as condições de conforto ambiental do ser humano, entende-se ainda, que em virtude dos graves problemas decorrentes da

impermeabilização maciça observada nas áreas urbanas, estas possibilidades estéticas e térmicas resultantes das associações entre luz e cor, merecessem ser investigadas e disponibilizadas como instrumentos da prática projectual e, como naturais desdobramentos das necessidades psicológicas de determinados grupos e atividades, como também, do testemunho da cultura de uma determinada comunidade e/ou sociedade.

3. A VISÃO INTEGRADA DA COR E DA LUZ

O estudo do conforto visual está ligado diretamente à questão da percepção visual por parte do homem e pode ser enfocado sob dois aspectos: o do ambiente físico iluminado, e sob o ponto de vista psico-fisiológico do observador.

Conforto visual pode ser definido como a condição de iluminação que não conduz a esforço visual ou dificuldade de visão, gerando bem-estar. De delimitação mais ou menos objetiva, este conceito pode ser aplicado a estudos como uma extensão da eficiência visual ou pode assumir a complexidade correspondente e inerente a uma ocorrência de conforto como julgamento resultante da interação visual.

Em consonância com os estudos de SILVA (1995), o conforto visual influi no espaço de maneira muito maior do que se pode imaginar, pois a visão, no homem, em relação aos outros sentidos, como o olfato, o tato, o paladar e a audição, tem uma influência de mais de 70%, isto é, a visão é o sentido mais importante no homem. E a cor ocupa um espaço de grande importância dentro desse estudo, pois ela age de maneira direta ou indireta na criação do espaço.

Com relação ao ambiente físico, deve ser considerado o tipo de iluminação, se natural, artificial ou ambos e no caso da iluminação natural se a mesma é obtida diretamente por incidência solar, de forma difusa pelo céu ou refletida pelo entorno. Já o aspecto psico-fisiológico leva em consideração a incidência da luz na retina, geração de impulsos nervosos e estímulos glandulares e as associações mentais e interpretações do ser humano de imagens formadas.

Os principais aspectos da iluminação que influenciam no conforto visual são o nível de iluminação; os contrastes de brilho e cor; o ofuscamento, que é provocado pelo excesso de brilho; e a modelação das formas e texturas e o sombreamento, que são influenciados pela posição da luz.

3.1. A PERCEPÇÃO HUMANA DE COR E LUZ

No olho humano, a retina está provida de células especiais, os cones e os bastonetes, responsáveis pela transformação da luz em impulsos elétricos que são transmitidos ao cérebro através dos nervos óticos. Da interpretação desses impulsos elétricos pelo cérebro verifica-se a percepção visual.

Os bastonetes são responsáveis pela visão em baixos níveis de luminância ($0,001 \text{ cd/m}^2$ ou menor) e não proporcionam a percepção da cor, enquanto os cones são sensíveis à luz, permitindo a decodificação da cor, necessitando de luminâncias acima de 3 cd/m^2 , para gerar este tipo de resposta.

Três características permitem distinguir as cores: matiz, saturação e luminância. A matiz é a forma pela qual definimos a cor, isto é a denominação pela qual distinguimos uma cor da outra. Por este atributo diferenciamos as cores através das palavras, ou seja determinamos se uma cor é verde, azul ou amarela, por exemplo.

A saturação é o atributo que determina o grau de intensidade de uma cor ou a sua pureza correspondente a um certo matiz que determina a sua diferença em relação à cor espectral padrão mais assemelhada. Por exemplo, permite distinguir um vermelho vivo de um vermelho pálido. À saturação é determinada pela quantidade de cor branca que se adiciona à cor pura, variando de zero para a cor branca pura até 100% para a cor pura ou espectral. O conjunto dos atributos matiz e saturação é denominado cromatismo.

A luminância é o atributo pelo qual um objeto parece ser mais ou menos luminoso do que outro. Este atributo, pode ser considerado como subjetivo, uma vez que é influenciado pelas condições de contorno. Ela pode ser relacionada por uma escala de valores entre o branco e o preto, e sua variação induz a sensação de mudança de cor, muito embora o cromatismo se mantenha constante.

Diferentemente das fontes luminosas, a cor de um material ou pigmento depende de sua capacidade de absorção da luz. Assim sendo, uma superfície que absorva todas as cores exceto o vermelho, transmitirá ou refletirá a luz desta cor, se a iluminarmos com luz branca natural. O processo de combinação de cores numa superfície é denominado subtrativo e da mesma forma que no processo aditivo (onde a combinação de duas fontes luminosas, que chegam simultaneamente ao olho, resultam em uma nova sensação cromática), é possível a obtenção de qualquer cor através da combinação de três cores primárias.

4. O PROJETO SUSTENTÁVEL, À ÓTICA DA COR E DA LUZ

No momento atual, o elevado custo da energia e a preocupação com a sustentabilidade do ambiente construído, faz com que haja uma preocupação com a preservação das fontes de abastecimento e com o meio ambiente, e como consequência este fato tem induzido aos profissionais da área de arquitetura e construções a minimizar o uso da energia elétrica. Em alguns casos as alterações se pautam em redução do fluxo luminoso sem critérios qualitativos, ou o que poderia gerar bons resultados, na utilização da iluminação natural com artificial, como método para o uso racional dos recursos energéticos. Em decorrência, as deficiências de projeto, relativas ao conforto ambiental vêm ocorrendo com maior frequência.

4.1 LUZ NATURAL

A luz natural, ou luz solar, é aquela que se chama costumeiramente de luz branca. Essa luz é variável com a densidade do ar, a hora do dia, os limites de latitude e o estado do céu. Além dos aspectos utilitários da iluminação, a mesma pode ser empregada como expressão de arquitetura, para a revelação de espaços e seus elementos e para a composição de ambientes para ocupação e contemplação. Os recursos empregados para essa utilização arquitetônica são a captação, a filtragem e a condução de luz natural.

A captação de luz é normalmente utilizada para a seleção de imagens e/ou definição de linguagem arquitetônica por meio de elementos construtivos específicos cujos atributos técnicos são sua localização, forma, dimensões e proporções. As ferramentas mais comuns utilizadas para captação são as aberturas, sejam janelas ou zenitais que, além de proporcionar iluminação, podem prover ventilação, efeito visual, compor plasticamente a arquitetura e ligar interior e exterior, etc.

A filtragem de luz pode se efetivar com a utilização de elementos translúcidos e de sombreamento. Os elementos construtivos apresentam formas com propriedades ópticas, com localização e desenhos variados, cada vez mais aprimorados pela tecnologia existente. Outros recursos são a condução, redistribuição ou redirecionamento de luz através da utilização de elementos opacos adicionais, externos ou internos à construção ou de superfícies delimitadoras do espaço.

Num país de elevada insolação como o Brasil, o uso da iluminação natural se mostra eficiente como forma de se atingir os objetivos da sustentabilidade, com relação ao emprego da luz e da cor nos ambientes. O uso da iluminação natural, entretanto, impõe dificuldades ao projetista, tendo em vista

o caráter variável da mesma, em função da localização dos fechamentos transparentes e translúcidos, da variabilidade com a hora e a época do ano, e a sua interferência no conforto térmico.

Essas dificuldades se tornam mais críticas, nos projetos em que a cor toma papel preponderante como forma de expressão estética ou de ambiência. Se constata, que na prática, os resultados obtidos ficam aquém do previsto, principalmente na passagem do período diurno para o noturno.

4.2 ASPECTOS IMPORTANTES DO USO DA COR

Entre os aspectos mais importantes, quando do uso da cor em um projeto, está o efeito emocional ou psíquico que a mesma exerce sobre o observador. O estudo simbólico da cor decorre não somente das crenças populares, ou das associações simbólicas criadas pelas civilizações, mas dos estudos científicos das áreas da psicologia e da fisiologia, que de acordo com os estudos de SILVA (1995), provaram que algumas simbologias não são apenas místicas, mas comprovadas cientificamente, afetando não apenas as pessoas, mas também o espaço em que a cor é empregada.

Dentre estas sensações, evidencia-se a sensação de cor fria ou quente. Cores tais como o amarelo, sempre associada à cor do Sol, e o vermelho, associado ao fogo, transmitem imediatamente a sensação de calor. Já cores como o verde e o azul (dependendo do quanto há de azul em sua composição), associados à água do mar, induzem a imagem mental de frio. Na Arquitetura, com o uso racional das cores, é possível se alterar a sensação psicológica de um ambiente naturalmente frio ou sem sol e sombrio, pelo uso de cores quentes em sua decoração, ou de forma contrária, num ambiente muito quente, transmitir uma sensação mais fresca pelo uso de cores frias.

Outra sensação importante, principalmente quando se quer obter um efeito de destaque sobre um elemento qualquer do ambiente, é a sensação de afastamento ou de aproximação proporcionada por algumas cores. Cores como o vermelho, o amarelo e o laranja, quando sobrepostas a um fundo de matiz pálida parecem se aproximar do observador. De forma oposta, cores frias como o verde e o azul parecem se afastar do observador e criam a ilusão de distância ou profundidade (HAYTON,1960).

Toda cor produz uma resposta emocional ou psíquica, ainda não suficientemente compreendida, e que pode variar de indivíduo para indivíduo. Cada pessoa tem suas próprias preferências ou desagrado por determinadas cores, ou momentos de preferência, porém são reconhecidas reações associadas a determinadas cores. Há reações fisiológicas e sensações subjetivas e sujeitas a variações individuais, porém as pesquisas já efetuadas comprovam que as respostas às cores são comuns e inconscientes e normalmente associadas à natureza. Os fenômenos coloridos exercem na vida cotidiana uma

influência inconsciente sobre o comportamento humano, onde as sensações cromáticas agem de maneira marcante, sem passar pela esfera do consciente; a escolha das cores acontece instintivamente.

O amarelo, normalmente associada ao Sol, é uma cor que normalmente induz a sensação de alegria e considerada estimulante. O vermelho, associado ao fogo, transmite sensação de calor e excitação. Já o laranja, uma associação do vermelho e do amarelo, reúne as qualidades de ambas, porém em menor grau.

Quanto às cores frias, o azul, associado ao céu e à água transmite sensação de serenidade ou frieza. O verde, associado à vegetação, transmite sensação de frescor e tranqüilidade. O violeta, combinação de verde e azul, expressa quando em tonalidade clara a sensação de delicadeza.

Existem também outras formas de associação às cores, relacionada às emoções e de grande significado psicológico. O vermelho é associado à paixão, violência e à ação. O laranja é associado à entusiasmo ou euforia. O amarelo significa poder, arrogância, alegria ou bom humor. O verde expressa descanso, esperança e juventude. O azul é relacionado à inteligência, sabedoria, conhecimento paz e quietude. Já o violeta significa profundidade, misticismo, mistério ou melancolia. Pode ser associada também à realeza, suntuosidade e dignidade.

A Cromoterapia baseia a sua prática em possíveis efeitos fisiológicos da cor. De acordo com a mesma, o vermelho aumenta a tensão muscular, ativa a respiração e estimula a pressão arterial. O laranja atua positivamente sobre a digestão. O amarelo é considerado um estimulante do sistema nervoso. O azul atua como calmante e redutor da pressão sanguínea. O verde contribui para o equilíbrio emocional e o violeta atua como sedativo.

Neste entendimento, e considerando as crescentes tensões sociais que vemos agravarem-se diariamente em razão do nosso particular momento histórico, poderíamos supor necessário o emprego de cor e luz no ambiente construído e, de forma complementar ao ambiente natural, focalizando os seus possíveis efeitos fisioterápicos.

4.3 A INTEGRAÇÃO DE LUZ E COR

Outro fenômeno de destaque, é a variação de tonalidade que se verifica quando um objeto ou superfície é submetido à luz em algumas partes e à sombreamento em outras. Esta variação de luz e sombra altera a maneira pela qual percebemos a forma e a cor do objeto ou superfície.

A textura superficial afeta a forma como percebemos a cor. Uma superfície lisa e brilhante, como as de porcelanas ou de metal polido reflete a luz em direções mais definidas, da mesma forma que um espelho, enquanto uma superfície mais áspera espalha de maneira difusa a luz que recebe. Esta propriedade física faz com que freqüentemente, uma cor de tonalidade mais escura num objeto com superfície de alta reflexividade, seja considerada por um observador como mais clara do que a de outro objeto de superfície áspera, de matiz similar porém de tom mais claro, devido à diferença na intensidade da luz refletida. Os objetos com superfícies lisas e brilhantes, podem também ter sua cor alterada, ou alterar a cor de seu entorno, dependendo da refração do meio circundante e de seu índice de reflexão.

Outrossim, a cor da luz incidente se soma à seletividade das superfícies na reflexão além dos olhos que interpretarão o resultado cromático final. De cor variável, embora com espectro contínuo, a luz natural modifica a cada instante as cores existentes num ambiente, enriquecendo nossa percepção e ampliando a referência temporal. O potencial desta gama de variações deve ser estimado, na concepção de ambientes interiores e exteriores, a partir das características climáticas, topográficas, mas sobretudo de latitude e cultural.

Uma ferramenta importante do uso da luz e da cor em projetos arquitetônicos, é o uso de contraste de brilho e cor, como forma de se definir espaços e criar ambientes. Através do uso do contraste do branco com o preto ou cinza, de cores clara com escuras, ou cores que se complementam, se é possível delimitar os espaços, ou se criar uma atmosfera no ambiente.

4.4 LUZ ARTIFICIAL E O EMPREGO DAS LÂMPADAS

Um fator de extrema relevância, quando se trata da reprodução de cores em projetos de interiores é a escolha das lâmpadas. Entre as diversas características de uma lâmpada, o índice de reprodução é aquele que exprime em que grau a mesma consegue mostrar as cores verdadeiras do objeto iluminado. Este índice varia de 0 a 100, sendo que as lâmpadas incandescentes têm por definição o valor 100. A incandescência é obtida com o aquecimento de um determinado material, que leva ao aumento das oscilações de suas moléculas, produzindo com isso a luz incandescente. Já as lâmpadas fluorescentes tradicionais têm índices entre 50 e 70 e se caracterizam por sua luminosidade clara, fria e constante, que provoca poucas sombras e não deslumbra.

O espectro luminoso de uma lâmpada não é uniforme, e dependendo da sua curva espectral determinadas cores podem ser realçadas ou mascaradas. Pode-se utilizar esta característica como

fator de destaque de uma determinada cor ou grupo de cores, de forma a se obter os efeitos estéticos ou ambiência desejados.

Verifica-se, pois, a necessidade de ampliação, em número e em facilidade de ferramentas que suportem o projeto de arquitetura bioclimática quanto ao uso de iluminação tanto natural quanto artificial.

5. CONCLUSÕES

Acreditamos que as reflexões produzidas neste ensaio ratificam a sustentabilidade do binômio cor-luz como uma poderosa ferramenta projetual para a arquitetura ambiental, particularmente no que diz respeito às questões do conforto térmico e visual, e dos inúmeros desdobramentos psicológicos e culturais dos países geograficamente compreendidos entre as latitudes dos trópicos.

Numa época onde a humanidade se conscientiza da necessidade de reduzir o consumo energético e preservar o meio ambiente, a arquitetura ambiental procura incentivar o uso de fontes de energia renováveis e não poluentes, e totalmente integradas ao entorno do local de implantação de uma edificação.

O que se pretende neste trabalho, é incentivar a investigação da influência da cor no comportamento humano e na sensibilidade ao espaço, no uso dos materiais e na elaboração de novos processos de cálculo luminotécnico, que possibilitem o uso de luz e cor de forma mais racional tanto do ponto de vista estético quanto energético.

Na área de materiais, pretende-se que os fabricantes de materiais e laboratórios de pesquisas públicos e privados, produzam dados sobre as características de reflexão e refração de materiais, com base no comprimento de onda da luz incidente. No que se refere ao cálculo luminotécnico, o que se procura é incentivar a pesquisa de novas metodologias de cálculo, que levem em conta as diversas frequências das ondas luminosas, de forma a proporcionar aos projetistas dados mais próximos à realidade do projeto fundamentado na cor.

Da mesma forma pretende-se incentivar o uso das curvas de distribuição espectral das lâmpadas, como forma de ressaltar as cores, de forma a se obter o destaque ou ambiência pretendidos pelos projetistas. Este incentivo poderá resultar numa maior divulgação e uso da ampla gama de lâmpadas existentes, e que são disponíveis hoje em ampla faixa de temperaturas correlatas.

No que se refere à uma possível função terapêutica, entende-se que se descortina um amplo e vasto campo de investigação, tanto nos ambientes projetados para o tratamento e a abordagem das patologias humanas, mas para todo e qualquer espaço em que circulem seres humanos e onde ocorram trocas emocionais. A validade destes estudos é entendida como uma aplicação a ser focalizada tanto no ambiente interno e na qualidade de vida do edifício, mas também, ampliada para o ambiente externo e à qualidade de vida das cidades sustentáveis.

No que concerne à abrangência cultural que caracteriza o uso da cor e da luz na produção arquitetônica e demais produções artísticas das sociedades localizadas na faixa dos trópicos e, particularmente, quando observamos a diferenciada formação étnica que caracteriza a população brasileira, havemos certamente de refletir sobre as infinitas possibilidades de expressão e consolidação cultural que poderão ser manifestas através de uma ação integrada e multidisciplinar, associando as ciências sociais, antropológicas, e arquitetônicas na geração do ambiente construído visando não apenas o bem-estar físico, mas a própria identidade cultural de uma determinada comunidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRAGA, Benedito et al. Introdução À Engenharia Ambiental. São Paulo: Prentice Hall, 2002.
- CREDER, Hélio. Instalações Elétricas. 10ª edição. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1986.
- DAJOZ, Roger. Ecologia Geral. Rio de Janeiro, Vozes Ed., 1983.
- EVANS, Ralph M. An Introduction to Color. Nova York. John Wiley & Sons. 1948. EDITORIAL, Blume, "El gran libro del color". Barcelona, 1982.
- GE Iluminação. Catálogo Geral de Produtos. Rio de Janeiro. 2002.
- GOMES, Ruy. O Problema do Conforto Térmico em Climas Tropicais e Subtropicais. Lisboa: LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1967.
- HAYTON, Peter J. El Color En Arquitectura y Decoracion. Barcelona. L.E.D.A. – Las Ediciones de Arte. 1960. MARCONI, Marina de Andrade e, PRESOTTO, Zélia M. N. Antropologia, Uma Introdução, 5ª edição. São Paulo: Editora Atlas S.A, 2001.
- MARINO, Marilza et al. Glossário de Termos Usuais em Ecologia. São Paulo, ACIESP, Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia e Academia de Ciências do estado de São Paulo, 1980.
- MOREIRA, Vinicius de Araújo. Iluminação Elétrica. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda. 1999.
- OLIVEIRA, Paulo Marcos P. de. Cidade Apropriada ao Clima – A Forma Urbana como Instrumento de Controle do Clima Urbano. Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Dissertação (Mestrado em Arquitetura), 1985.
- RAPOPORT, Amos. Vivenda y Cultura. Barcelona, Gustavo Gilli Ed., 1972.
- RATTNER, Henrique. Tecnologia e Sociedade, Inovação Tecnológica e Desenvolvimento. São Paulo: Editora Brasiliense, 1980.
- RIBEIRO, M. Ecologizar: Pensando o Ambiente Humano. Belo Horizonte: Rona, 1998.
- RONINETTE, Gary O. Landscape Planning for Energy Conservation. EUA: Van Nostrand Reinhold Company, 1983.
- SANTOS, M. Metamorfoses do Espaço Habitado. São Paulo: Hucitec, 1997.
- SILVA, A. C.S.B.; SATTLER, M. A.; LAMBERTS, R. Zoneamento Bioclimático Brasileiro para Fins de Edificação. Gramado, RS. 1995. III Encontro Nacional e I Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. Gramado, 1995.
- SILVA, Ana Paula Ferreira da. A Cor no Conforto Ambiental: Um estudo sobre a importância da cor na obtenção do Conforto Ambiental. Orientador: Ana Maria Rambauke. Rio de Janeiro: UFRJ/FAU/PROARQ. 252p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura), 1995.

TECNIRAMA – Enciclopédia da Ciência e da Tecnologia. Rio de Janeiro. Editorial Codex S.A. 1965/1966.
TEIXEIRA, Maria da Purificação. O Solo, como Agente de Sustentabilidade para uma Arquitetura e Urbanismo

Ambientalmente Corretos. Orientador: Mônica Santos Salgado. Co-orientador: Maria Cristina Moreira Alves. Rio de Janeiro: UFRJ/FAU/PROARQ. 219p. Dissertação. (Mestrado em Arquitetura – Racionalização do projeto e da Construção), 2004.

VIEIRA, Fernanda Marques. Proposta de Roteiro para Análise e Concepção Bioclimática de Espaços Externos Urbanos. Estudo de Caso: Praças. Orientador: Oscar Daniel Corbella. Rio de Janeiro: UFRJ/FAU/PROARQ. 233p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura), 1994.

Capítulo 6



10.37423/220305635

PROJETO BÔNUS FOTOVOLTAICO: ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA DAS UNIDADES PROSSUMIDORAS CONTEMPLADAS

Andrigo Filippo Antonioli

Universidade Federal de Santa Catarina

Helena Flávia Naspolini

Universidade Federal de Santa Catarina

João Pedro Frederico de Abreu

Universidade Federal de Santa Catarina

Clarissa Debiazi Zomer

Universidade Federal de Santa Catarina

Ana Lígia Papst de Abreu

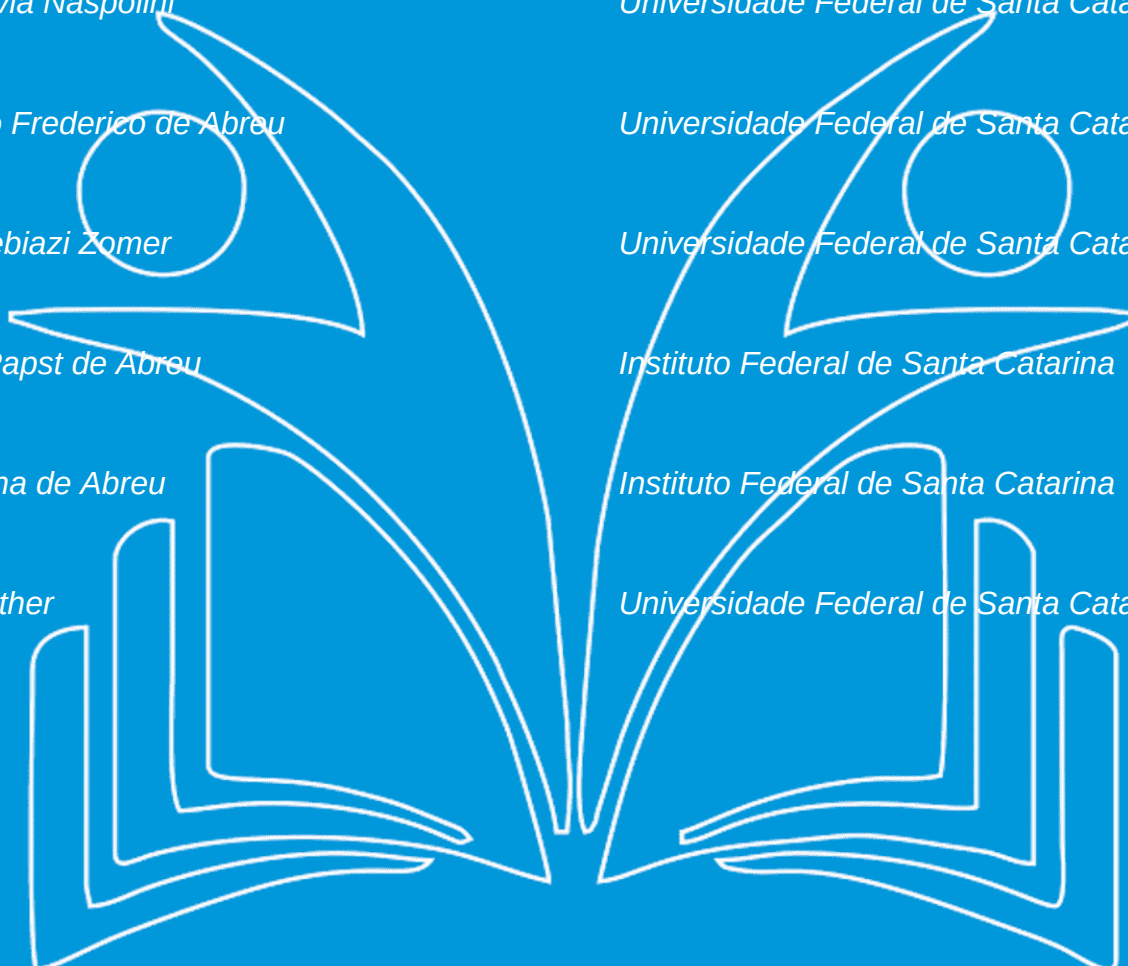
Instituto Federal de Santa Catarina

Samuel Luna de Abreu

Instituto Federal de Santa Catarina

Ricardo Rüther

Universidade Federal de Santa Catarina



Resumo: O objetivo deste trabalho é avaliar o impacto da geração fotovoltaica (FV) sobre o perfil de consumo e sobre as despesas com energia elétrica de uma Unidade Prosumidora (UP) contemplada no Projeto de Eficiência Energética das Centrais Elétricas de Santa Catarina (Celesc), intitulado “Bônus Fotovoltaico”. Os resultados mostraram que, sob a ótica da concessionária, o consumo anual da Unidade Consumidora (UC) antes da integração FV foi de 4.840 kWh/ano. Após a integração FV, a UC passou a ser uma UP e o seu consumo foi de 3.756 kWh/ano (redução de consumo de 22%) e a energia ativa excedente injetada na rede da concessionária, compensada nas faturas de energia elétrica foi de 2.485 kWh/ano. Já sob ótica do prosumidor, o consumo total anual da UP antes da inserção da geração FV foi de 4.840 kWh e após a integração FV foi de 4.924 kWh/ano. Observou-se então, que após o Projeto de Eficiência Energética “Bônus Fotovoltaico” a UP não apresentou mudança significativa no seu consumo total anual de energia elétrica (aumento de 2%). No entanto, a redução anual de despesas com a concessionária foi de R\$ 1.637,82 (54%).

Palavras-chave: Eficiência energética, Prosumidor, GD-FV

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de sistemas fotovoltaicos (FV) às edificações, conhecida pelo termo em inglês, *Building-Applied Photovoltaics* (BAPV) é uma solução tecnológica adequada para fornecer eletricidade aos edifícios com um impacto mínimo. Tipicamente, os módulos FV são instalados sobre coberturas ou fachadas já existentes, respeitando a arquitetura e o envelope construtivo (ANTONIOLLI et al., 2016; MANOJ; SUDHAKAR; SAMYKANO, 2019; PORTOLAN; RÜTHER, 2012; WANG et al., 2016; WEN et al., 2017; ZOMER et al., 2013; ZOMER; ANTONIOLLI; CUSTÓDIO, 2016).

Os níveis médios de irradiação solar global horizontal registrados no Brasil estão entre os melhores do mundo (1.312-2.234 kWh/m².ano) (PEREIRA et al., 2017). A menor média anual de irradiação solar dentro do território brasileiro está na região sul do país (1.654 kWh/m².ano) onde fica localizado o estado de Santa Catarina, que apresenta níveis de irradiação solar entre 1.312 a 1.720 kWh/m².ano ao longo de seu território (95.443 km²).

O mercado brasileiro de geração distribuída (GD) para pequenos produtores começou em 2012, com a aprovação da resolução normativa RN 482/2012 (ANEEL, 2012), que criou e regulamentou o sistema de compensação de energia elétrica (SCEE) no país. Esse modelo de tarifação, também conhecido em outros países, como *net metering*, permitiu ao consumidor cativo possuir sistema de geração própria e acumular ou trocar créditos com a concessionária de energia elétrica.

Em 2015, com a publicação da RN 687/2015 foram regulamentados sistemas com múltiplas unidades de consumo, geração compartilhada e autoconsumo remoto (ANEEL, 2015). Essa resolução normativa facilitou o desenvolvimento de novos modelos de negócios em geração compartilhada no Brasil. As partes interessadas podem participar de um consórcio ou cooperativa, visando produzir sua própria energia através de um sistema distribuído de geração micro (até 75 kW) ou mini (entre 75 kW e 5 MW). Com a redução dos preços da tecnologia fotovoltaica (FV) nos últimos anos, a integração FV na cobertura de edificações se tornou cada vez mais acessível aos consumidores brasileiros, em parte devido aos sistemas de GD cuja viabilidade econômica, no Brasil, ocorreu por meio do SCEE.

Na ótica do consumidor, a GD representa uma economia relativa à compra de energia da rede. Ou seja, quanto mais energia o consumidor gerar, menos ele irá adquirir da distribuidora. Com isso, nasce a figura de um novo agente para o mercado de GD, o Prossumidor (Consumidor – Produtor), interessado em investir na autogeração de energia elétrica.

Apesar da GD muitas vezes ser vista como uma ameaça ao tradicional modelo de negócio praticado atualmente dentro do contexto legal e regulatório, a Celesc, Concessionária de Energia Elétrica de Santa Catarina, lançou o Projeto de Eficiência Energética intitulado “Bônus Fotovoltaico” com o intuito de incentivar o desenvolvimento de medidas que promovam a eficiência energética e o combate ao desperdício de energia elétrica.

Para a sociedade, é interessante que a distribuidora veja a GD-FV como uma nova oportunidade, em vez de um risco ao seu modelo antigo, podendo desenvolver novos modelos de negócio de modo a compartilhar dos benefícios que a GD-FV pode trazer para o sistema de distribuição.

Neste artigo, foi feita a análise energética de uma unidade consumidora (UC) com geração solar fotovoltaica contemplada no âmbito do Projeto Bônus Fotovoltaico, promovido pelo Programa de Eficiência Energética – PEE da Celesc. O estudo apresenta as premissas arquitetônicas utilizadas para o projeto do BAPV a ser instalado na residência, bem como as estratégias bioclimáticas utilizadas para reduzir seu consumo de energia. Estimativas de geração de energia FV realizadas a partir dados de irradiação solar, medidos em superfície e estimados a partir de imagens de satélite, foram comparadas com os valores de geração FV medidos pelo inversor. Seu principal objetivo foi avaliar o impacto da geração fotovoltaica (FV) sobre o perfil de consumo e sobre as despesas com energia elétrica de uma UP contemplada no Projeto de Eficiência Energética “Bônus Fotovoltaico”.

2. OBJETO DE ESTUDO

2.1 PROJETO BÔNUS FOTOVOLTAICO

O Projeto Bônus Fotovoltaico (CELESC, 2017) consistiu em um projeto realizado pelo Programa Eficiência Energética da Celesc que foi operacionalizado sob licitação e contrato pela ENGIE Geração de Energia Fotovoltaica. Seu objetivo foi incentivar a geração de energia elétrica, através da instalação de sistemas fotovoltaicos em residências unifamiliares, e promover a eficiência energética e o combate ao desperdício de energia elétrica. Inicialmente o projeto previa a realização de 1.000 instalações; porém, devido à grande aceitação e números de inscritos para o programa, bem como pela viabilização econômica da expansão resultante da economia de escala e redução de custos experimentada pela tecnologia fotovoltaica ao longo da execução do projeto, foram instalados no total 1.250 sistemas idênticos de produção de energia elétrica. O projeto teve como intuito viabilizar a instalação de kits fotovoltaicos de 2,6 kWp em unidades consumidoras residenciais e beneficiar os participantes com bônus de 60% do valor total do custo de aquisição de um sistema fotovoltaico em

relação ao preço de mercado. Além disso, o projeto visou incentivar o consumidor a gerar energia através de fontes renováveis e fornecer o excedente da energia não utilizada pela residência para a rede de distribuição, incrementando a geração distribuída.

Para a participação do projeto, eram necessários alguns requisitos tais como: (a) a Unidade Consumidora deveria ser exclusivamente residencial e estar adimplente com a Celesc; (b) o participante deveria ter um número de CPF cadastrado na Celesc para a Unidade Consumidora inscrita; e (c) o consumo médio mensal de energia dos 12 meses anteriores à data do cadastro deveria ser de, no mínimo, 350 kWh.

Além disso, as residências nas quais iriam ser instalados os kits FV deveriam possuir telhado com espaço suficiente para colocação dos módulos, ou seja, 20 m² contínuos livres de sombreamento; a inclinação do telhado onde seriam instalados os módulos deveria estar entre 15° e 35° em relação ao plano horizontal e orientada para o Norte com um desvio azimutal máximo de 30° para leste ou oeste.

Sistemas BAPV orientados para norte (azimute zero), mesmo com diferentes valores de inclinação (15° a 45°), não apresentam diferenças relevantes na produtividade ou no rendimento econômico se comparados com sistemas BAPV com inclinação da latitude local. Já os BAPVs orientados para leste e oeste (desvio azimutal $\pm 90^\circ$), com diferentes valores de inclinação, apresentam redução significativa na produtividade do sistema (ANTONIOLLI et al., 2016). Simulações no Global Solar Atlas - GSA (2018) mostram que sistemas com azimute zero e inclinações variando entre 0-30° apresentam diferença insignificante (1%) na produtividade. Já para sistemas com desvio azimutal $\pm 90^\circ$ as diferenças são $\geq 10\%$.

A distribuição dos sistemas FV em Santa Catarina foi feita de acordo com a divisão do estado em mesorregiões, conforme mapa da Fig. 1.



Fig. 1 - Mesorregiões do Estado de Santa Catarina.

Todos os sistemas FV integrantes do projeto “Bônus Fotovoltaico” são idênticos. São formados por um kit composto por dez módulos da marca JA Solar, modelo JAP6-60-265/4BB (265 Wp) e por um inversor da marca ABB, modelo UNO-3.0-TL-OUTD (3 kW).

2.2 DESCRIÇÃO ARQUITETÔNICA DA RESIDÊNCIA ANALISADA

A residência objeto de estudo localiza-se na cidade de Florianópolis - SC ($27,6^{\circ}\text{C}/48,5^{\circ}\text{O}$), cidade caracterizada por possuir um clima com quatro estações bem definidas. Seu projeto arquitetônico foi concebido considerando o melhor aproveitamento da energia solar, tanto térmico quanto fotovoltaico. Portanto, a primeira decisão de projeto foi a escolha de um terreno adequado para sua implantação. A escolha de um terreno em aclave orientado ao norte foi uma das primeiras diretrizes projetuais com foco no aproveitamento solar nesta residência, minimizando a interferência de sombreamento do entorno, mesmo com possíveis alterações e/ou construções novas na vizinhança. O conceito de arquitetura bioclimática e redução de consumo de energia foram as diretrizes nas etapas iniciais de projeto.

A proposta inicial da edificação foi baseada em estudos de cortes esquemáticos e de volumetria (Fig. 2), com foco na orientação a norte: (a) dos coletores solares para aquecimento de água em telhado mais baixo do que o reservatório de água quente, possibilitando a circulação natural; (b) dos módulos FV em telhado superior com área suficiente para instalação do sistema. Como resultado do projeto, chegou-se ao corte apresentado na Fig. 3.

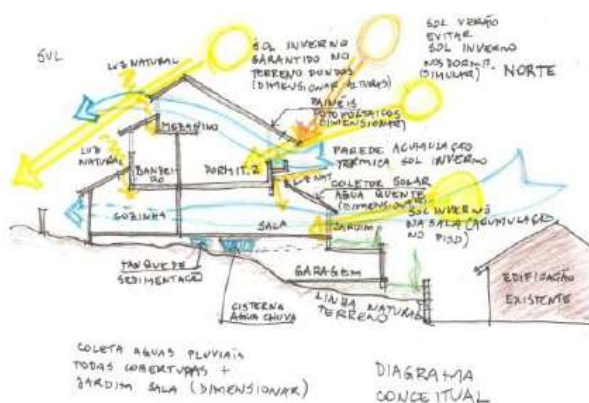


Fig. 2 – Esquema conceitual da proposta

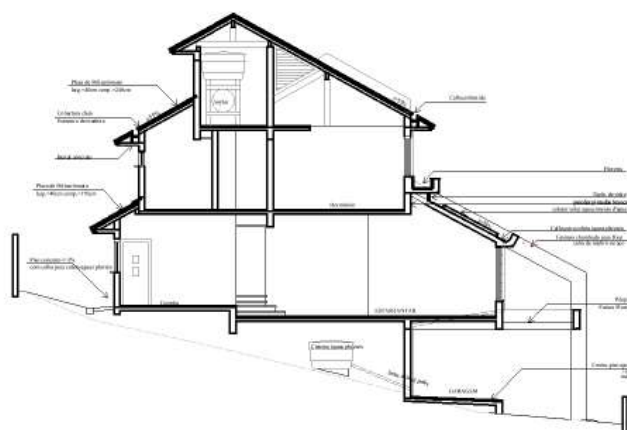


Fig. 3 – Corte esquemático da residência

A integração de módulos FV à edificação não foi realizada durante a construção, porém, foi reservado espaço no telhado com orientação adequada e infraestrutura com eletrodutos, o que facilitou a instalação posterior. Os coletores térmicos do sistema de aquecimento solar de água foram instalados durante a construção da mesma (Fig. 4).



Fig. 4 – Kit FV e coletores térmicos aplicados à cobertura da residência contemplada pelo Programa Bônus FV.

Durante a fase de projeto, a inclinação adotada para o sistema FV foi de 28° (latitude aproximada de Florianópolis) com desvio azimutal de $+30^\circ$, e a área destinada aos coletores termossolares foi de 10 m^2 para o sistema com capacidade de fornecimento de 500 litros de água aquecida por dia.

A fixação dos módulos FV à cobertura deu-se através de uma estrutura metálica garantindo um afastamento de 10 cm entre módulos e telhas cerâmicas. Dessa forma, há ventilação sob os mesmos e o calor pode ser dissipado mais facilmente. Vale ressaltar que o sistema FV é livre de sombreamento, visto que nem as chaminés próximas causam sombras sobre os módulos em nenhum período do ano.

3. METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em três etapas. Na primeira etapa, foi feita a análise do recurso solar disponível em banco de dados de satélite e da estação meteorológica mais próxima do sistema FV. Na segunda etapa, a geração energética real medida do sistema FV foi comparada com a geração energética estimada e os índices de produtividade (*Yield*) teóricos e medidos foram comparados. A terceira etapa consistiu em analisar as faturas mensais de energia elétrica no período de um ano antes da instalação FV e de um ano após o início de operação do sistema FV a fim de identificar os impactos energéticos sob a ótica da Concessionária e da Unidade Prossumidora (UP).

3.1 RECURSO SOLAR NO LOCAL DE INSERÇÃO DA UP

Os dados de irradiação utilizados neste artigo são oriundos de duas fontes: (i) O Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ª edição (PEREIRA et al., 2017), que apresenta dados de satélite disponibilizados pelo Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), que se encontram na resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (aproximadamente 10×10 km) apresentados por meio do Sistema de coordenadas geográficas SIRGAS1 2000 e; (ii) A Estação Meteorológica da UFSC (COLLE, 2007), com dados medidos de irradiância com resolução temporal de 1 minuto. O período analisado compreende os meses de out/2016 a set/2017 a out/2018 a set/2019.

Nos dias em que os registros da estação da UFSC apresentaram falta de dados, foi utilizada a metodologia de preenchimento de dados (*gap filling*) de (SCHWANDT et al., 2014). O procedimento de preenchimento de dados para dados faltosos de até 10 dias é de substituir as falhas dos primeiros cinco dias com dados do dia anterior ao início da falha e os cinco últimos dias de falha com dados do dia após a falha. O limite de 10 dias é definido devido ao fato de admitir-se que o tempo permanece constante por um período de até cinco dias. Além disso, a posição do sol não se desvia significativamente durante um período de cinco dias, portanto variações bruscas de clima são desconsideradas.

Após a etapa de aquisição e tratamento de dados, foi feita a análise da variabilidade interanual da irradiação solar global horizontal (GHI) por meio dos dados medidos da estação solarimétrica da UFSC.

Para isso, foram integrados os dados, em intervalos de um minuto, para escala mensal (kWh/m².mês) e comparadas as diferenças, mês a mês, entre os períodos de out/2016 a set/2017 e de out/2018 a set/2019, bem como a diferença total anual, objetivando mostrar a variabilidade interanual e intersazonal da irradiação solar.

Em seguida, os dados medidos foram transpostos, por meio do modelo de Perez (PEREZ et al., 1987), para duas situações: (i) Sistema FV com inclinação igual à latitude local e desvio azimutal zero; (ii) Sistema FV com inclinação igual à latitude local e desvio azimutal +30°, objetivando identificar a irradiação incidente no plano dos módulos FV (GPOA). Para sistema FV com inclinação igual à latitude local e desvio azimutal zero foram utilizados, na simulação realizada, valores de Irradiação Inclinada (GTI) extraídos do banco de dados de satélite do Atlas.

3.2 GERAÇÃO E PRODUTIVIDADE FV (YIELD) DA UP

O cálculo da produtividade foi dividido em duas etapas:

I - Cálculo *Yield* teórico: Por meio da Eq. 1, é possível calcular a produtividade teórica, que representa o quanto de energia é gerada para cada unidade de potência instalada (kWh/kWp) usando como base dados de irradiação inclinada de satélite do Atlas e de irradiação oriunda da Estação de solo da UFSC.

$$Y_i = PR \times \frac{GTI_i}{Irr_{CPT}} \quad (1)$$

onde:

Y_i = produtividade do BAPV, no intervalo de tempo especificado i , [kWh/kWp]

PR = taxa de desempenho (*Performance Ratio*) na base anual = tipicamente 80% (MARION et al., 2005; REICH et al., 2012; RÜTHER; VIANA; SALAMONI, 2010)

GTI_i = irradiação no plano inclinado, no intervalo de tempo especificado i [kWh/m²].

Irr_{CPT} = irradiância nas condições padrão de teste = 1 kW/m².

II - Cálculo *yield* medido: O cálculo da produtividade do microgerador do Bônus FV, tem como base os valores medidos da geração, que será dividida pelo valor de potência instalada do sistema (2,65 kWp), conforme apresentado na Eq. 2.

$$Y_i = \frac{E_{FVi}}{P_{FV}} \quad (2)$$

onde:

Y_i = Produtividade do BAPV, no intervalo de tempo especificado i [kWh/kWp]

E_{FVi} = Energia solar fotovoltaica gerada, no intervalo de tempo especificado i [kWh]

P_{FV} = Potência fotovoltaica instalada (= 2,65 kWp)

3.3 PERFIS DE CONSUMO DA UP

O *Yield* medido será comparado com o *Yield* teórico. Nesse item serão comparadas: a expectativa da produtividade fotovoltaica, baseada em estimativas por meio de valores teóricos e dados de irradiação de solo e satélite, com a produtividade medida, durante o período de out/2018 a set/2019.

3.3.1 PERFIL DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DA UP SOB A ÓTICA DA CONCESSIONÁRIA

Nesse item, são analisadas as faturas de energia elétrica da UP durante um ano de consumo após a integração FV (out/2018 a set/2019) e comparadas com os valores registrados em um ano anterior, sem sistema FV (out/2016 a set/2017).

Tanto os valores de consumo como os valores referentes à energia injetada na rede, são extraídos a partir dos dados apresentados nas faturas de energia elétrica. Com isso, é possível analisar a evolução dos custos com energia elétrica após a integração do sistema FV na UP. A UP tem rede trifásica e é obrigada a pagar um custo mínimo de disponibilidade da rede equivalente ao consumo de 100kWh (ANEEL, 2010).

3.3.2 PERFIL REAL DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DA UP

Nesse item são analisadas as faturas de energia elétrica da UP durante um ano de consumo após a integração FV (out/2018 a set/2019) e comparadas com os valores registrados em um ano anterior, sem sistema FV (out/2016 a set/2017).

A Eq. 3 apresenta o consumo real da UP.

$$Consumo_i = Consumo_{Celesc_i} + GerFV_i - Ener_Inj_i \quad (3)$$

Onde:

Consumoi = Consumo da UP, no intervalo de tempo especificado i [kWh]

Consumo Celesci = Consumo da energia elétrica oriunda da Celesc (fatura), no intervalo de tempo especificado i [kWh]

GerFVi = Energia FV gerada na UP, no intervalo de tempo especificado i [kWh]

Ener_Inji = Energia excedente injetada na rede elétrica da Celesc (fatura) [kWh]

Em seguida, os gastos financeiros antes e após a integração nos mesmos anos são comparados, com o objetivo de quantificar, em valores percentuais, qual foi o impacto financeiro na despesa anual com energia elétrica.

4. RESULTADOS

4.1 RECURSO SOLAR NO LOCAL DE INSERÇÃO DA UP

A Fig. 5 apresenta, para os períodos compreendidos entre out/2016 a set/2017 e out/2018 a set/2019, a Irradiação Global Horizontal (GHI) em Florianópolis, a partir de dados extraído da Estação Solarimétrica da UFSC.

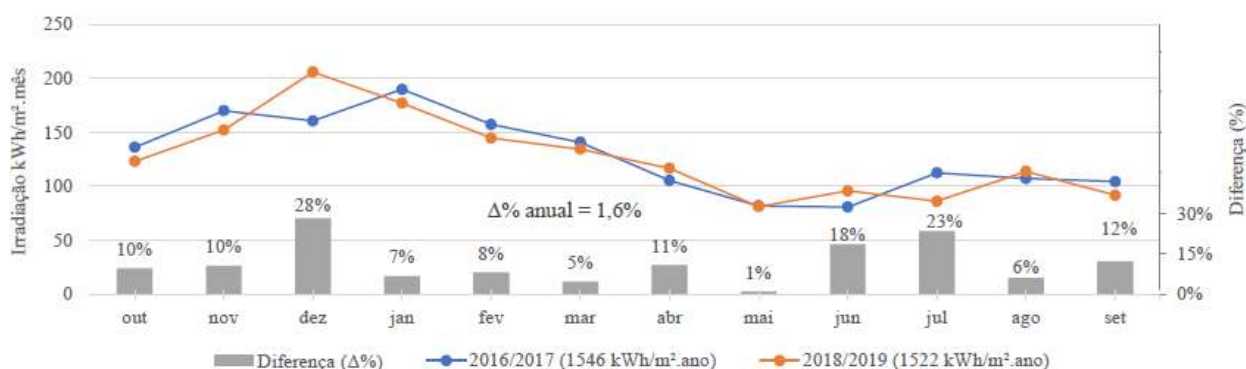


Fig. 5 – Irradiação Global Horizontal out/2016 a set/2017 e out/2018 a set/2019. Base de dados: Estação Solarimétrica UFSC

Os resultados mostram que no período de 2016/2017, GHI apresentou valor de 1.546 kwh/m².ano e no período 2018/2019 valor de 1.522 kwh/m².ano. As diferenças em relação ao ano com geração FV para o ano anterior (sem geração FV), apresentaram valores absolutos maiores em dezembro (28%) e em julho (23%). No entanto, quando o comparativo é feito em uma base anual, a diferença é diluída, apresentando uma pequena variação (1,58%).

A Fig. 6 apresenta, para diferentes situações, o perfil da disponibilidade solar medida durante o período de 2018/2019 e os valores de irradiação inclinada extraídos do banco de dados de satélite do Atlas 2ª edição.

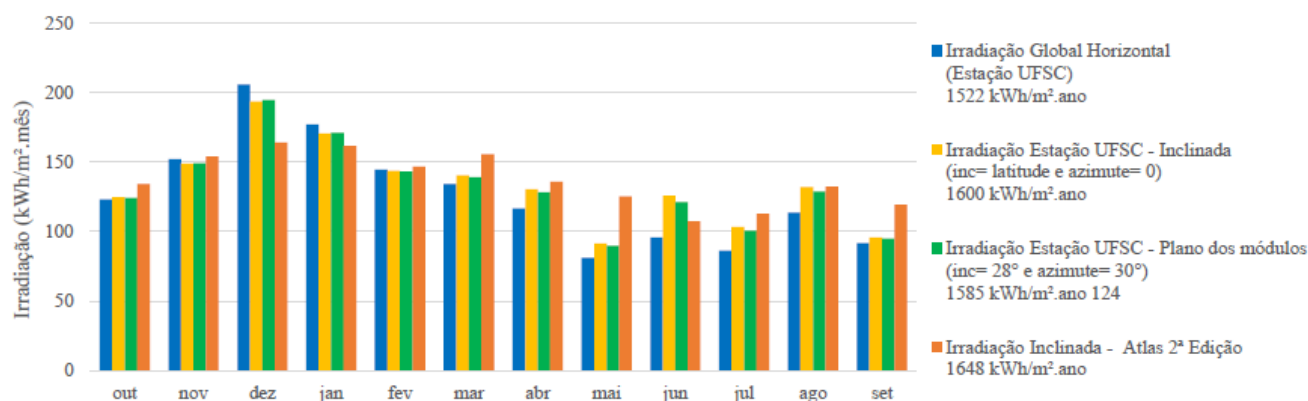


Fig. 6 - Perfil de disponibilidade solar dos dados de irradiação medidos por estação de solo (GHI, GTI e GPOA) durante 2018/2019 e dados de irradiação inclinada de satélite (GTI) extraídos do Atlas Brasileiro de Energia Solar

Os resultados mostram GHI para a Estação UFSC (1.522 kWh/m².ano), bem como os valores para suas transposições para a inclinação igual a latitude local - GTI (1.600 kWh/m².ano) e para o plano dos módulos/arranjo FV GPOA (1.585 kWh/m².dia). Nota-se que com a transposição do plano horizontal para o plano inclinado houve um acréscimo anual de 4,9% no valor da irradiação. Observa-se diferença inferior à 3,0% entre a irradiação inclinada calculada a partir de dados medidos na Estação UFSC e a irradiação inclinada obtida a partir dos valores extraídos do banco de dados do Atlas (1.648 kWh/m².ano).

O valor de irradiação incidente no plano dos módulos (1.585 kWh/m².ano) não apresentou diferença significativa (1%) quando comparado com o encontrado para inclinação igual à latitude e azimute igual a zero (1.600 kWh/m².ano), para dados oriundos da Estação UFSC. Logo, as condições de integração adotadas para o sistema fotovoltaico estão de acordo com o bom aproveitamento do recurso solar disponível.

4.1 PRODUTIVIDADE FV (YIELD) DA UP

A Fig. 7 apresenta a evolução mensal da produtividade estimada e medida para as três diferentes situações: (i) irradiação inclinada para a instalação FV com inclinação igual à latitude e azimute igual a zero (Estação UFSC); (ii) irradiação no plano dos módulos do BAPV (Estação UFSC) e; (iii) irradiação inclinada para a instalação FV com inclinação igual à latitude e azimute igual a zero (Atlas Brasileiro de Energia Solar).

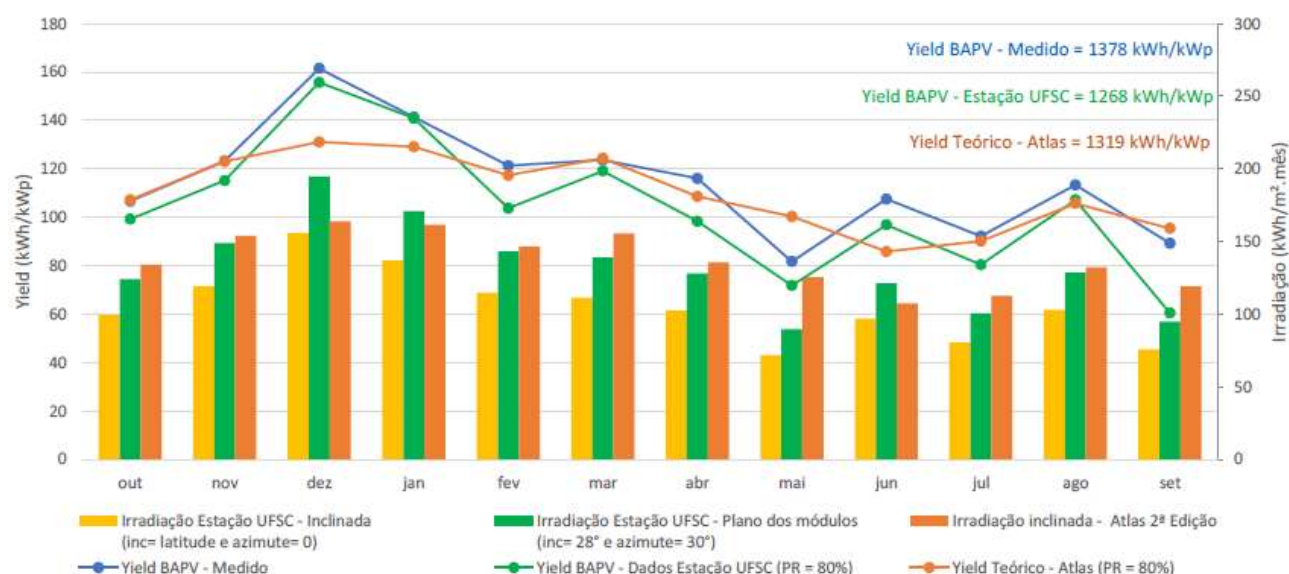


Fig. 7 – Produtividade (Yield) para diferentes situações: produtividade teórica, produtividade simulada (Estação da UFSC) e produtividade medida (2018/2019).

4.2 PERFIS DE CONSUMO DA UP

Ao comparar as curvas de perfil azul (*Yield BAPV – medida*: que representa o cálculo da produtividade através dos dados de geração extraídos diretamente do inversor do sistema BAPV durante o período de out/2018 a set/2019) e verde (*Yield BAPV – Estação UFSC*: que representa o cálculo da produtividade usando PR 80% e dados de irradiação medidos durante o período de out/2018 a set/2019) é possível observar que ambas apresentam variações semelhantes.

Observa-se que para as três diferentes situações os valores de produtividade anual foram respectivamente de 1.378 kWh/kWp.ano para “*Yield BAPV – medida*”, 1.268 kWh/kWp.ano para “*Yield BAPV simulada – Estação UFSC*” e 1.319 kWh/kWp para “*Yield teórica – Atlas*”. Observa-se que a produtividade anual BAPV medida foi 4,5% maior do que a produtividade teórica esperada com base nos valores de satélite.

Observa-se que os perfis de produtividade para as situações “*Yield BAPV – medida*” e “*Yield BAPV estimada – Estação UFSC*” são bem parecidos. Entretanto, os valores medidos em base anual foram maiores que a expectativa teórica (1.378 kWh/kWp contra 1.268 kWh/kWp, com diferença de 8,0%). Já para as situações “*Yield BAPV – Estação UFSC*” e “*Yield Teórica – Atlas*” os resultados foram respectivamente de 1.268 kWh/kWp e 1.319 kWh/kWp, com diferença de 3,8%.

4.2.1 PERFIL DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DA UP SOB A ÓTICA DA CONCESSIONÁRIA

A Fig. 8 apresenta a evolução mensal do consumo (fonte: Celesc) da UP antes da integração FV (azul claro, período 2016/2017), e depois da integração FV (azul escuro, período 2018/2019) e a energia excedente injetada na rede elétrica pela UP (amarela, período 2018/2019) obtidos a partir das faturas de energia elétrica da UP.



Fig. 8 – Perfil de consumo de energia elétrica da UP: Ótica da concessionária Celesc.

Sob a ótica da concessionária, os resultados mostram que o consumo anual da UC antes da integração FV foi de 4.840 kWh. Após a integração FV, o consumo anual da UP foi de 3.756 kWh/ano (redução de consumo de 22%) e a energia ativa excedente injetada na rede da concessionária (compensada nas faturas de energia elétrica da UP) foi de 2.485 kWh/ano.

4.2.2 PERFIS DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DA UP

A Fig. 9 apresenta a evolução mensal do consumo da UP antes da integração FV (2016/2017, linha azul), depois da integração FV (2018/2019, linha rosa), da energia FV excedente injetada na rede elétrica (2018/2019, barra verde), da geração FV(2018/2019, barra azul) produzida pelo sistema BAPV e do consumo de energia elétrica da UC oriundo da concessionária (Celesc).

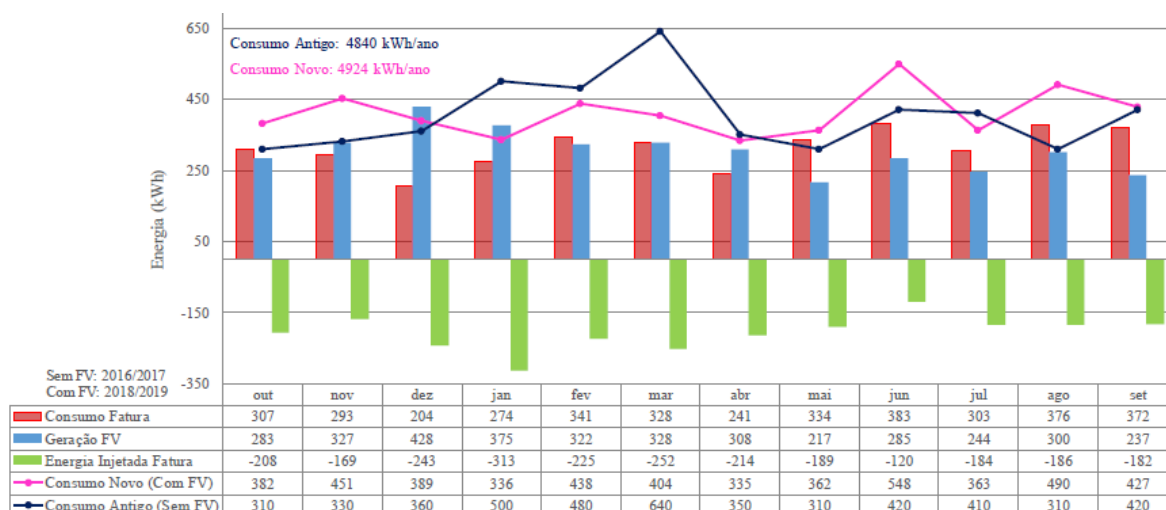


Fig. 9 – Perfis de consumo de energia elétrica da UP: Ótica do consumidor/prossumidor.

Os resultados mostram que antes da integração do sistema FV (2017), a UC apresentou consumo anual de energia elétrica de 4.840 kWh, totalmente suprida pela Celesc. Após a integração do sistema FV (2019), a UP apresentou geração FV de 2.653 kWh (dos quais 2.485 kWh foram injetados na rede da concessionária) e consumo de energia elétrica proveniente da Celesc de 3.756 kWh. Neste caso o consumo da UP foi de 4.924 kWh/ano (3.756 kWh oriundos da concessionária e 1.168 kWh oriundos da geração de energia FV).

Observou-se que após o Projeto de Eficiência Energética Bônus Fotovoltaico a UP não apresentou mudança significativa do seu consumo total anual de energia elétrica (aumentou em 2%). Entretanto, o fato de gerar sua própria energia para autoconsumo somada ao acúmulo créditos devido à energia excedente injetada na rede elétrica para uso posterior, faz com que suas despesas com energia elétrica sejam reduzidas.

A Fig. 10 apresenta as despesas com energia elétrica (Celesc) antes e após a inserção da geração solar FV na UP e a redução das despesas (%) com a concessionária devido a integração FV.

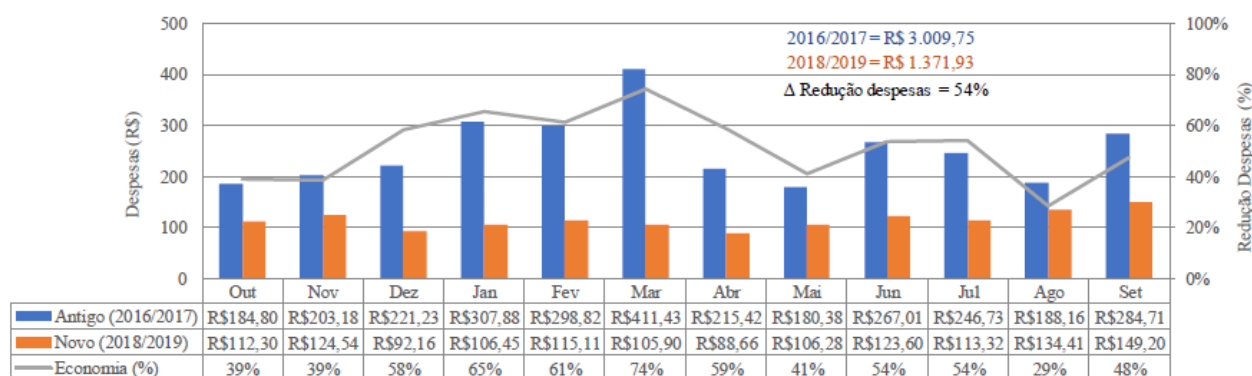


Fig. 10 – Gastos com energia: Antes e depois da integração FV.

Os resultados mostraram redução de despesas com a concessionária em todos os meses do período analisado. A agregação da energia solar FV à residência proporcionou redução anual das despesas com energia elétrica (com a Celesc) de R\$ 1.637,82 (54%).

5 CONCLUSÕES

O artigo apresentou uma análise energética aprofundada de uma UP contemplada pelo PEE Bônus Fotovoltaico. O contato com os proprietários da residência e os gerentes do projeto facilitaram o acesso às informações e enriqueceram o trabalho. Dados de geração de energia FV foram extraídos diretamente do inversor com resolução temporal de 5 minutos e dados de irradiação da estação meteorológica da UFSC apresentaram resolução temporal de 1 minuto. A proximidade com os proprietários também permitiu acesso ao projeto e às faturas de energia elétrica da residência.

Durante as análises do recurso solar disponível para a simulação (medido em solo e de satélite), foi possível observar a variabilidade interanual e inter sazonal dos valores de irradiação, por isso é indicado usar a média histórica de vários anos para reduzir e amortizar as diferenças geradas por anos atípicos.

O plano de orientação e inclinação dos módulos FV do BAPV ($\text{Inc} = 28^\circ$ e $\text{Az} = +30^\circ$) estão em condições muito próximas da instalação ideal ($\text{Inc} = \text{latitude}$ e $\text{Az} = 0$), não apresentando diferenças significativas no recurso solar disponível (1%).

Os valores de produtividade calculados por meio de dados de geração medidos apresentaram produtividade anual maior do que a produtividade esperada com base nos valores de satélite (1.378 kWh/kWp contra 1.319 kWh/kWp), com diferença de 4,3%, ou seja, a diferença encontrada não foi significativa.

Sob a ótica da concessionária, os resultados mostraram que o consumo anual da UC antes da integração FV foi de 4.840 kWh. Após a integração FV, o consumo anual da UP foi de 3.756 kWh/ano (redução de consumo de 22%) e a energia ativa excedente injetada na rede da concessionária (compensada nas faturas de energia elétrica da UP) foi de 2.485 kWh/ano.

Em um primeiro momento, a redução de 22% no consumo de apenas uma UC aparenta ser uma ameaça à concessionária, tendo em vista que o número de UPs vem se multiplicando a cada ano e novos modelos de negócios aplicados a esse segmento vem surgindo. Entretanto, sob a ótica do setor elétrico, os custos evitados devido à agregação da energia solar fotovoltaica à residência (geração distribuída) necessitam ser avaliados.

Sob a ótica do prossumidor, os resultados mostraram que o consumo total anual da UP antes da inserção da geração FV foi de 4.840 kWh e após a integração FV foi de 4.924 kWh/ano. Pode-se concluir então, que após o Projeto de Eficiência Energética “Bônus Fotovoltaico” a UP não apresentou mudança significativa do seu consumo total anual de energia elétrica (aumento de 2%). No entanto, a redução anual de suas despesas com a concessionária foi de R\$ 1.637,82 (54%).

O artigo mostra o exemplo prático de uma UP residencial devido ao fato de que esse tipo de sistema é o que mais cresce no mundo, com uma escalabilidade orgânica. Esse crescimento em massa de pequenos produtores se conectando à rede elétrica de distribuição gera um paradigma para as concessionárias, que até então não sabem afirmar se isso é bom ou ruim.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa Engie Brasil, por contribuírem no desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Resolução Normativa no 414, de 9 de Setembro de 2010 Brasília Governo Federal - Ministério de Minas e Energia, , 2010.

ANEEL. Resolução Normativa no 482, de 17 de abril de 2012, 2012.

ANEEL. Resolução Normativa no 687, de 24 de novembro de 2015, 2015.

ANTONIOLLI, A. F. et al. Avaliação técnica e econômica entre sistemas fotovoltaicos aplicados a edificações (BAPV) e sistemas idealmente instalados para máxima geração anual. Revista Brasileira de Energia Solar, v. 3, n. 1, p. 4–12, 2016.

CELESC. Projeto Bônus Fotovoltaico. Disponível em: <<http://bonusfotovoltaico.celesc.com.br/>>.

COLLE, S. Horizon at station Florianopolis PANGAEA, , 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.669515>>

GSA. The World Bank Group: Global Solar Atlas.

MANOJ, N.; SUDHAKAR, K.; SAMYKANO, M. Case Studies in Thermal Engineering Performance comparison of BAPV and BIPV systems with c-Si , CIS and CdTe photovoltaic technologies under tropical weather conditions. Case Studies in Thermal Engineering, v. 13, n. December 2018, p. 100374, 2019.

MARION, B. et al. Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. n. February, 2005.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar 2a. Edição Revisada e Ampliada. 2.ed. ed. São José dos Campos : INPE: [s.n.].

PEREZ, R. et al. A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. Solar Energy, v. 39, n. 3, p. 221–231, 1987.

PORTOLAN, Í.; RÜTHER, R. The potential of building-integrated (BIPV) and building-applied photovoltaics (BAPV) in single-family , urban residences at low latitudes in Brazil. Energy & Buildings, v. 50, p. 290–297, 2012.

REICH, N. H. et al. Performance ratio revisited : is PR > 90 % realistic ? Research and Applications, n. January, p. 717–726, 2012.

RÜTHER, R.; VIANA, T.; SALAMONI, I. Reliability and long term performance of the first grid-connected, building-integrated amorphous silicon PV installation in Brazil. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Anais...2010

SCHWANDT, M. et al. Development and test of gap filling procedures for solar radiation data of the Indian SRRA measurement network. Energy Procedia, v. 57, p. 1100–1109, 2014.

WANG, W. et al. Environmental assessments and economic performance of BAPV and BIPV systems in Shanghai. Energy & Buildings, v. 130, p. 98–106, 2016.

WEN, Z. et al. A rapid evaluation method of existing building applied photovoltaic (BAPV) potential. *Energy & Buildings*, v. 135, p. 39–49, 2017.

ZOMER, C. D. et al. Performance compromises of building-integrated and building-applied photovoltaics (BIPV and BAPV) in Brazilian airports. *Energy & Buildings*, v. 66, p. 607–615, 2013.

ZOMER, C. D.; ANTONIOLLI, A. F.; CUSTÓDIO, I. P. Centro De Pesquisa E Capacitação Em Energia Solar Da Ufsc : Integração Fotovoltaica À Arquitetura E Simulações De Desempenho Energético. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 11, n. 1, p. 36–42, 2016.