

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – CAMPUS ARARANGUÁ**

**GABRIEL DA SILVEIRA ESPÍNDOLA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
DE ENERGIA**

**ARARANGUÁ, 2016**

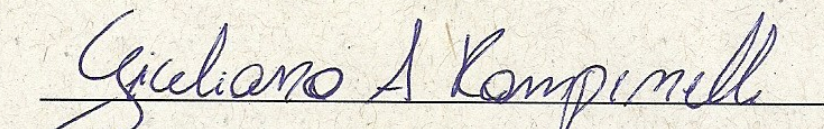


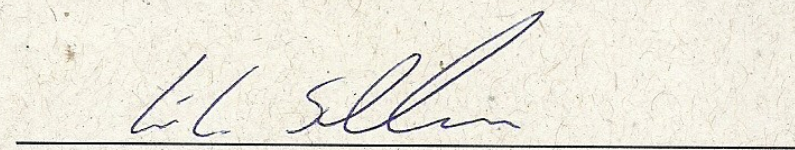
**GABRIEL DA SILVEIRA ESPINDOLA**

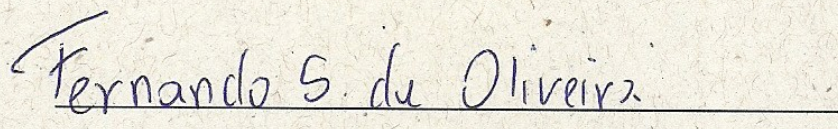
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

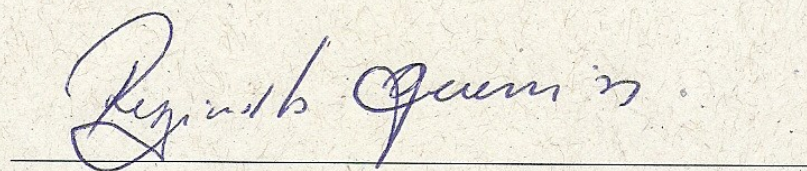
Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Araranguá

Aprovado em: 06/07/2016

  
Prof. Giuliano Arns Rampinelli (Orientador)

  
Prof. César Cataldo Scharlau (Examinador)

  
Prof. Fernando Schuck de Oliveira (Examinador)

  
Prof. Reginaldo Geremias (Supervisor)



# **SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE UMA PLANTA PILOTO COM ELEMENTOS DE ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

**Gabriel da Silveira Espíndola\***

## **RESUMO**

A fim de reduzir o impacto econômico e ambiental causado pelo consumo de energia elétrica em edificações, ações que promovem eficiência energética na arquitetura e geração distribuída se mostram cada vez mais pertinentes. Por serem soluções ainda pouco implantadas no Brasil, surgem algumas dificuldades para se elaborar projetos que as contemplem. Este trabalho tem como objetivo apresentar ferramentas que auxiliam na concepção de projetos que prezam a eficiência energética na edificação combinada à geração distribuída utilizando sistemas fotovoltaicos. Para isto, foi utilizado como exemplo o projeto de uma planta piloto com arquitetura bioclimática e nível A de eficiência energética, construída na cidade de Araranguá - SC apresentando os *softwares* Dialux, *PowerDomus* e SAM nos dimensionamentos e simulações. Ações de efficientização dos sistemas de iluminação e condicionamento de ar foram tomadas no projeto. A potência do sistema fotovoltaico dimensionado para a área disponível do telhado inclinado e da fachada ventilada permitem suprir cerca de 84% do consumo de energia elétrica da edificação, considerando a condição de maior consumo. Os objetivos do trabalho foram alcançados ao apresentar ser possível integrar o projeto de geração distribuída com sistemas fotovoltaicos à concepção do projeto arquitetônico e dimensionar com estratégias de efficientização os sistemas de iluminação e condicionamento de ar.

Palavras-chaves: Arquitetura bioclimática. Eficiência energética. Geração distribuída. Sistemas fotovoltaicos.

---

\* Graduando do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88900-000. E-mail: gabriel\_instu@hotmail.com.

## 1 INTRODUÇÃO

As edificações comerciais representam parte considerável do consumo energético nacional, em 2014 foram responsáveis por 14,5% do consumo da energia elétrica gerada no Brasil (EPE 2015). Conforme publicado por Procel (2008), no ano de 2005, os sistemas de iluminação foram responsáveis por 18,8% do consumo de energia elétrica das edificações comerciais alimentadas por media tensão, enquanto os sistemas de climatização representaram 40,3% do seu consumo.

Estes dados de demanda por energia elétrica do setor comercial deixam evidente o impacto positivo que a implementação de projetos arquitetônicos adequados ao clima com estratégias naturais de climatização e iluminação natural apresentam no consumo de energia elétrica destas edificações. (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2012).

Com estas premissas, em fevereiro de 2009 foi lançado pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) em parceria com o INMETRO o Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) com o objetivo de estabelecer parâmetros para a determinação do nível de eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas (CARLO, 2008).

Além das ações de redução do consumo de energia nas edificações, através de ações de eficiência energética, há a possibilidade da produção da energia junto à edificação, utilizando os sistemas fotovoltaicos como material de construção, para assim reduzir ainda mais os impactos econômicos e ambientais inerentes ao consumo de energia elétrica (RÜTHER et al., 2012).

Entretanto, a implementação, tanto de ações de eficiência energética quanto sistemas de geração distribuída tem melhor retorno do investimento quando contempladas ainda na fase de projeto, para isso, há a necessidade do conhecimento prévio do perfil de consumo de energia elétrica da edificação (RÜTHER et al., 2012).

Este trabalho tem como objetivo apresentar ferramentas que auxiliam na concepção de projetos que prezam a eficiência energética na edificação combinada à geração distribuída com sistemas fotovoltaicos através do exemplo do projeto de uma planta piloto com arquitetura bioclimática e nível A de eficiência energética, construída na cidade de Araranguá – SC, no âmbito do projeto de pesquisa e

desenvolvimento (P&D) Estudo e desenvolvimento de revestimentos cerâmicos fotovoltaicos aplicados em arquitetura bioclimática.

## **2 REFERÊNCIAL TEÓRICO**

Nesta seção serão mostradas as premissas teóricas utilizadas na elaboração do trabalho.

### **2.1 Eficiência energética na arquitetura**

A eficiência energética na arquitetura pode ser entendida como o potencial inerente a cada edificação de promover conforto térmico, acústico e visual com uso da menor quantidade de energia possível. (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2012)

De acordo com Carlo (2008), o consumo de energia em edificações está diretamente relacionado aos sistemas consumidores, como os sistemas de climatização, iluminação artificial e equipamentos, e de variáveis que interferem nestes sistemas, como partes do envoltório da edificação e a forma de uso de destes sistemas consumidores de energia. A edificação influencia no consumo de energia elétrica através das trocas térmicas da envoltória, que somados aos ganhos de calor dos equipamentos, iluminação e pessoas, geram uma carga térmica, que deve ser compensada pelo sistema de condicionamento de ar a fim de manter os índices de conforto térmico no interior da edificação.

Posto isto, fica evidente que, para reduzir o consumo de energia das edificações não basta somente promover a efficientização de equipamentos consumidores de energia elétrica, mas também atuar nas características da edificação que possam minimizar a necessidade do uso destes sistemas.

Neste âmbito, a partir de 2005, com base no Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), que já conferia a alguns equipamentos consumidores de energia a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), desenvolveu-se os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) que contêm os requisitos necessários para classificação do nível de eficiência energética das edificações a partir da

avaliação de parâmetros relativos à envoltória, sistema de iluminação e ar-condicionado das edificações comerciais e públicas. (PBEEDIFICA, 2016).

### 2.1.1 Iluminação eficiente em edificações

Devido à grande participação do sistema de iluminação no consumo final de energia elétrica de edificações comerciais, o RTQ-C estabelece níveis mínimos de eficiência ou máximo de consumo para estes sistemas (PBEEDIFICA, 2016).

Apesar do grande impacto no desempenho energético do sistema de iluminação, a eficiência das luminárias ainda não é avaliada pelo PBE e, por isso, não pode ser incluída na metodologia de etiquetagem de edifícios. Os requisitos para a avaliação do nível de eficiência energética do sistema de iluminação, são basicamente, a densidade de potência de iluminação instalada ( $DPI_L-W/m^2$ ), estabelecida pelo tipo de uso do ambiente, e o uso da iluminação natural em ambientes com aberturas voltadas para o exterior (VASCONCELLOS, 2013).

Para o projeto de sistemas de iluminação eficientes, geralmente se faz necessário o uso de *softwares* que simulam as condições de iluminação natural e artificial em um ambiente durante o projeto arquitetônico. Alguns dos principais *softwares* de simulação de iluminação disponíveis no Brasil são o TropLux o ReLux e o DIALux, sendo neste último, possível realizar simulações de iluminação natural e artificial através de um modelo fotorrealístico e acessar informações de luminárias e lâmpadas a partir de seu extenso banco de dados (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2012).

## 2.2 Geração distribuída com sistemas fotovoltaicos

Desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade, gerando créditos de energia que podem ser utilizados em meses subsequentes (BRASILIA, 2016).

A geração distribuída a partir de geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos se dá a partir da integração dos módulos fotovoltaicos à rede de

distribuição de energia elétrica através de um inversor de frequência que controla a injeção de potência na rede mantendo critérios de qualidade e segurança (PINHO e GALDINO, 2014).

### 2.2.1 Sistemas fotovoltaicos aplicados em arquitetura bioclimática

São duas as formas de aplicação de sistemas fotovoltaicos em edificações, a mais comum refere-se aos sistemas fotovoltaicos que supõem uma adaptação de unidades integradas no edifício, uma vez completada a construção, estes sistemas são denominados *building-applied photovoltaics* (BAPV). De outro modo, os módulos fotovoltaicos podem fazer parte da estrutura de um edifício em substituição a materiais de construção convencionais como telhas, janelas, clarabóias e fachadas, sendo estes, classificados como *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV) (RÜTHER; SANTOS, 2014).

Os módulos fotovoltaicos são fabricados para operar por longos períodos de tempo, mesmo expostos às intempéries, com isto, são apropriados à integração ao envoltório de edificações. Sistemas fotovoltaicos integrados ao envelope da construção podem ter a dupla função de gerar eletricidade e de funcionar como elemento arquitetônico na cobertura de telhados, paredes, fachadas ou janelas. (RÜTHER, 2004).

Rüther e Santos (2014) mostram que a integração de sistemas fotovoltaicos à edificações deve ser avaliada previamente, de acordo com o desvio azimutal e a inclinação do plano onde o sistema deverá ser instalado, pois a irradiação solar anual pode variar consideravelmente de acordo com estes parâmetros. A Figura 1 mostra a relação da irradiação solar anual com o ângulo azimutal e a inclinação, para a cidade de Florianópolis.

As fachadas ventiladas, utilizadas para proteger as paredes externas da edificação das intempéries, são utilizadas, principalmente em países da Europa, como integração dos módulos fotovoltaicos ao edifício, aproveitando a estrutura disponível e mantendo sua funcionalidade, como pode ser visto na Figura 2 (CHIVELET; SOLLA, 2007).

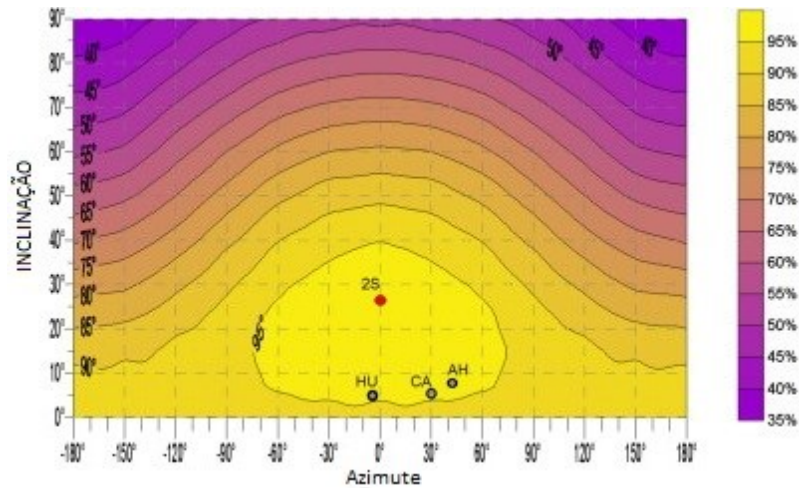


Figura 1 - Relação da irradiação anual com o ângulo azimutal e a inclinação para a cidade de Florianópolis. (RÜTHER; SANTOS, 2014).



Figura 2 - Exemplo de fachada ventilada. (CHIVELET; SOLLA, 2007).

### 2.2.2 Avaliação do desempenho de sistemas fotovoltaicos

A grande variabilidade associada a sistemas fotovoltaicos torna necessária a definição de parâmetros que possibilitem comparar sistemas diferentes, em relação à configuração, tecnologia e localização geográfica (ALMEIDA, 2012).

De acordo com Almeida (2012) o desempenho global ou razão de performance e a produtividade final são figuras de mérito técnico amplamente utilizadas, que definem o desempenho geral de sistemas fotovoltaicos.



A produtividade final ( $Y_F$ ), mostrada na equação 1, representa a quantidade de energia elétrica fornecida pelo inversor ( $E_R$ ) por unidade de potência nominal instalada do gerador fotovoltaico ( $P_{NG}$ ) e permite comparar sistemas fotovoltaicos de diferentes tamanhos, pois normaliza a produção de energia em relação a potência nominal (ALMEIDA, 2012).

$Y_F = \frac{E_R}{P_{NG}}$	(1)
----------------------------	-----

Já o desempenho global ou razão de performance (PR), mostrado na equação 2, representa o efeito total de falhas e perdas em um sistema fotovoltaico e permite comparar sistemas, independentemente da posição geográfica, posicionamento dos módulos fotovoltaicos e potência nominal pois normaliza a produtividade em relação à irradiação normalizada ( $Y_R$ ) (ALMEIDA, 2012).

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (2)$$

### 3 METODOLOGIA

Esta seção faz referência aos métodos utilizados no dimensionamento das cargas da planta piloto, para o posterior dimensionamento do sistema fotovoltaico conectado à rede.

O sistema de iluminação foi dimensionado com o auxílio do software DIALux, respeitando os requisitos do RTQ-C e das normas vigentes. Com as informações do sistema de iluminação e outros elementos que interferem na carga térmica, foi dimensionado o sistema de climatização, através do *software* de simulação termo-energética *PowerDomus*, que posteriormente também foi utilizado para a simulação do consumo anual de energia elétrica da edificação.

#### 3.1 Levantamento das cargas

Como visto anteriormente, as principais cargas responsáveis pelo consumo de energia elétrica nas edificações de uso comercial são os sistemas de iluminação e climatização. O RTQ-C estabelece os requisitos mínimos para a obtenção do nível

de eficiência energética para estes sistemas, fazendo com que, para a obtenção do nível A de eficiência energética e o atendimento das normas vigentes, seja necessário um projeto mais elaborado para o correto dimensionamento.

### 3.1.1 Cargas do sistema de iluminação

A eficiência da iluminação é determinada de acordo com a densidade de potência instalada da iluminação interna para cada tipo de atividade exercida no ambiente. Para ambientes de escritório, como considerado neste trabalho, a densidade de potência de iluminação limite (DPL) para o nível A de eficiência energética é  $9,7 \text{ W/m}^2$ , de acordo com o método da área do edifício. (INMETRO, 2010)

O projeto luminotécnico teve como base a norma NBR ISO 8595-1 que trata da iluminação em ambientes de trabalho. A tabela 1 apresenta os valores de iluminância mantida ( $E_m$ ), limitação de ofuscamento ( $UGR_L$ ) e qualidade da cor ( $R_a$ ) para os diferentes ambientes da planta piloto, de acordo com a norma acima citada.

**Tabela 1** - Parâmetros de cálculo.

<b>Ambiente</b>	<b><math>E_m</math> (lux)</b>	<b><math>UGR_L</math></b>	<b><math>R_a</math></b>
<b>Escritório</b>	500	19	80
<b>Banheiros</b>	200	25	80
<b>Corredor</b>	100	28	40

Fonte:(ABNT, 2013)

A escolha das lâmpadas deu-se com base em estudos que compararam diversas tecnologias, principalmente lâmpadas compostas por diodos emissores de luz (LED) e fluorescente tubular. Estudos demonstram que apesar da evolução das lâmpadas LED, não se pode afirmar que esta tecnologia é a que apresenta o melhor custo benefício, dependendo da aplicação. A eficiência das lâmpadas LED é equiparada a das lâmpadas fluorescentes. Além disso, as lâmpadas fluorescentes tubulares T5 e T8 dissipam entre 73% e 77% da energia em forma de calor, enquanto as LED de alto brilho dissipam entre 87% e 90%, tornando esta última tecnologia mais onerosa ao sistema de condicionamento de ar. (LAMBERTS; GHISI; PESSOA, 2013)

Com a necessidade do controle de ofuscamento, em ambientes de escritório, se faz necessário o uso de luminárias com aletas difusoras, sendo que, para este tipo de luminária, as lâmpadas mais empregadas são as fluorescentes tubulares e as LED tubulares, assim optou-se por utilizar um sistema de iluminação com lâmpadas fluorescentes alimentadas por reatores, ambos de alta eficiência, e luminárias com aletas para controle de ofuscamento de alto rendimento.

As lâmpadas utilizadas nos ambientes de escritório são da marca Philips, modelo *MASTER TL5 High Efficiency Eco*, e nos demais ambientes, foi empregada a luminária completa com LED e driver modelo PF106-S da marca LUMICENTER. A Tabela 2 mostra as características das lâmpadas utilizadas (PHILIPS, 2016; LUMICENTER, 2016).

**Tabela 2** - Dados técnicos das lâmpadas.

Modelo	Potência (W)	Eficiência (lm/W)	T (K)	IRC	Vida útil (horas)
TL5 HE-840	13	92	4000	82	25000
TL5 HE-840	25	103	4000	82	25000
PF106-S	15	73,3	4000	84	Não informado

Fonte: (PHILIPS, 2016; LUMICENTER, 2016)

Os Reatores utilizados são da marca Philips, modelo HF-Regulator II para lâmpadas TL5 – dimerizável (PHILIPS, 2016). A Tabela 3 apresenta as principais características do reator.

**Tabela 3** - Características do reator.

Modelo	Fator de Potência	Perdas (W)
HF-R 2 14-35 TL5	0.98	5.3-6.5

Fonte: (PHILIPS, 2016)

A luminária escolhida para os ambientes de escritório foi da marca LUMICENTER, modelo FAA20-S com refletor parabólico em alumínio alto brilho, aletas parabólicas em alumínio alto brilho e rendimento de 76% (LUMICENTER, 2016).

O número de luminárias em cada ambiente foi determinado a partir da densidade de potência de iluminação para o nível A de eficiência energética, de acordo com o RTQ-C. A potência de iluminação instalada inclui as perdas nos

reatores. A potência instalada e densidade de potência de iluminação dos ambientes da planta piloto são mostradas na Tabela 4.

**Tabela 4 - DPIL por cômodo e Total da planta piloto**

Ambiente	Área(m <sup>2</sup> )	Luminária	Potência(W)	QTD	DPI <sub>L</sub> (W/m <sup>2</sup> )
AT1	9,2	2X13	31,9	3	10,4
AT2	13,8	2X13	31,9	4	9,2
Recepção	27,1	2X25	55,9	4	8,3
Corredor	7,5	1X15	15	3	6,0
Banheiro	2,55	1X15	15	1	5,9
Total	62,7	-	521,9	-	8,32

Fonte: do autor.

Para verificar a adequação aos parâmetros citados na norma de iluminação de ambientes de trabalho, mostrados na tabela 1, o sistema de iluminação dimensionado pelo método do RTQ-C foi simulado no *software* DIALux. As figuras de 3 a 6 mostram a modelagem dos ambientes no *software* DIALux.

A simulação da iluminação considerou a contribuição da luz natural nos ambientes - com exceção da área de circulação e banheiros - tendo em vista o perfil de uso da edificação que acontece somente no período das 08:00 às 17:00.

Para calcular a contribuição da iluminação natural, foram criados quatro cenários para cada ambiente: Sem iluminação natural e iluminação natural combinada com artificial às 08:00, 12:00 e 17:00 para calcular a iluminância do ambiente em casos extremos e identificar o período do dia em que há a menor contribuição da iluminação natural. Ainda com o intuito de considerar o pior caso de iluminação natural, o céu foi considerado encoberto. Estes cenários foram simulados para os solstícios e equinócios a fim de garantir que a iluminância no interior atingiria os níveis aceitáveis durante todos os períodos do ano.

As Figuras de 7, 8 e 9 mostram os resultados das simulações dos ambientes para os diversos horários e períodos do ano.





Figura 3 - Área técnica 1 (Fonte: do autor)



Figura 4 - Área Técnica 2 (Fonte: do autor)



Figura 5 - Recepção (Fonte: do autor)



Figura 6 - Circulação (Fonte: do autor)

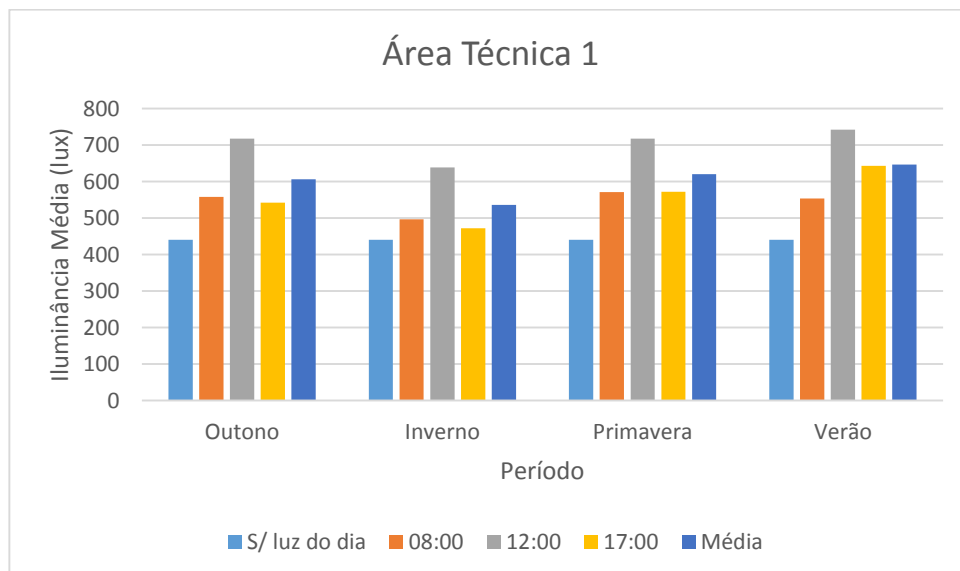


Figura 7 - Simulação dos cenários de iluminação para Área técnica 1. (Fonte: do autor).

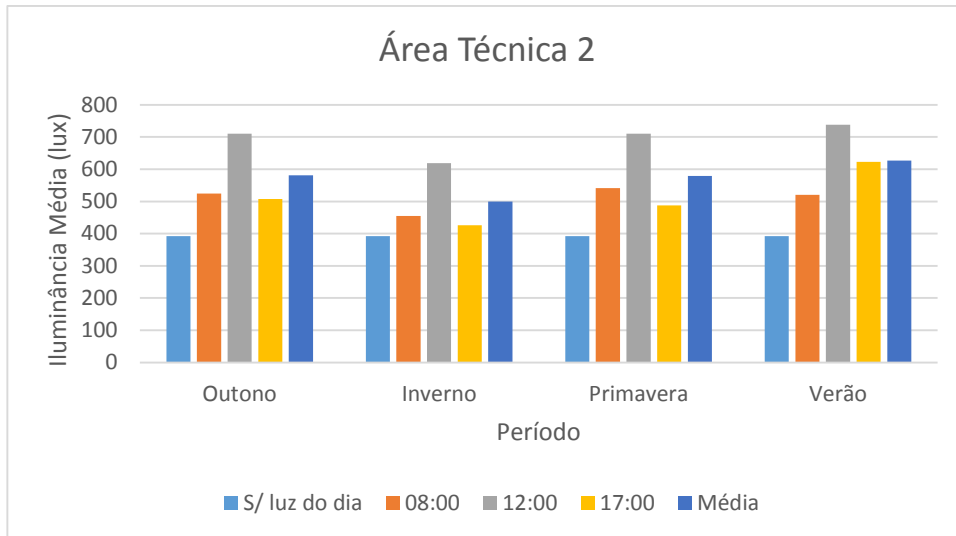


Figura 8 - Simulação dos cenários de iluminação para Área técnica 2. (Fonte: do autor).

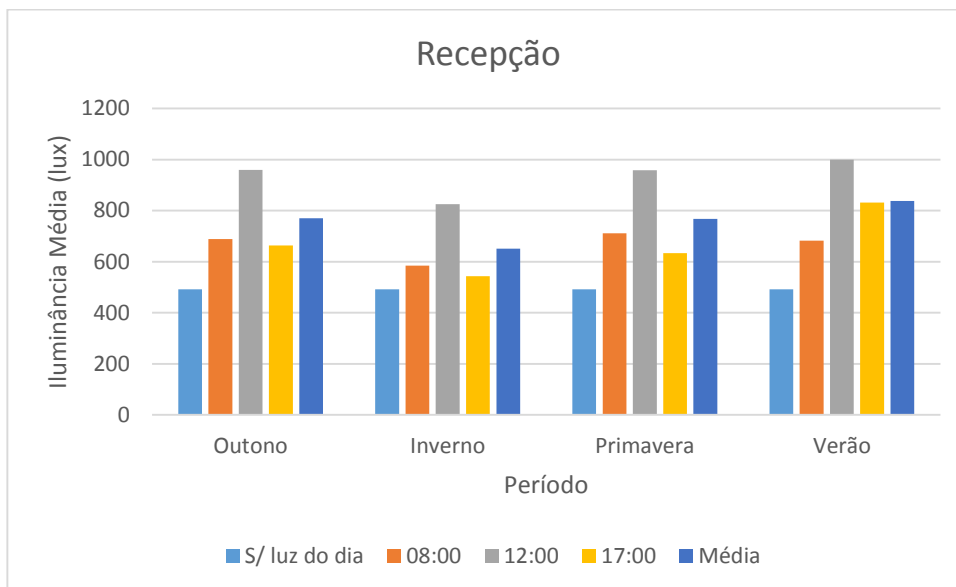


Figura 9 - Simulação dos cenários de iluminação para Recepção. (Fonte: do autor).

A simulação mostrou que nas Áreas técnicas 1 e 2 ao amanhecer e entardecer no período do inverno, a iluminância média do ambiente pode ficar até 14% abaixo no nível adequado. Entretanto, a média diária mostra que a inadequação se dá apenas nas horas iniciais e finais do dia, atendendo, portanto, a adequação na maior parte do período. Cabe ressaltar que foi considerado o pior caso de iluminação natural e que a média diária da iluminância em todos os períodos simulados ficou igual ou acima do nível mínimo.

Para completar a análise da qualidade do sistema de iluminação, o índice de ofuscamento (UGR) também foi simulado e comparado com os valores limite mostrados na tabela 1. Os resultados da simulação podem ser vistos na Figura 10.

Pode ser observado que nas Áreas técnicas 1 e 2 o valor calculado ficou ligeiramente acima do UGR limite estabelecido pela norma NBR ISO 8595-1. Isso ocorre principalmente pela característica da geometria – cômodos pequenos com pé direito próximo de três metros - e não pela característica da luminária (ABNT, 2013).

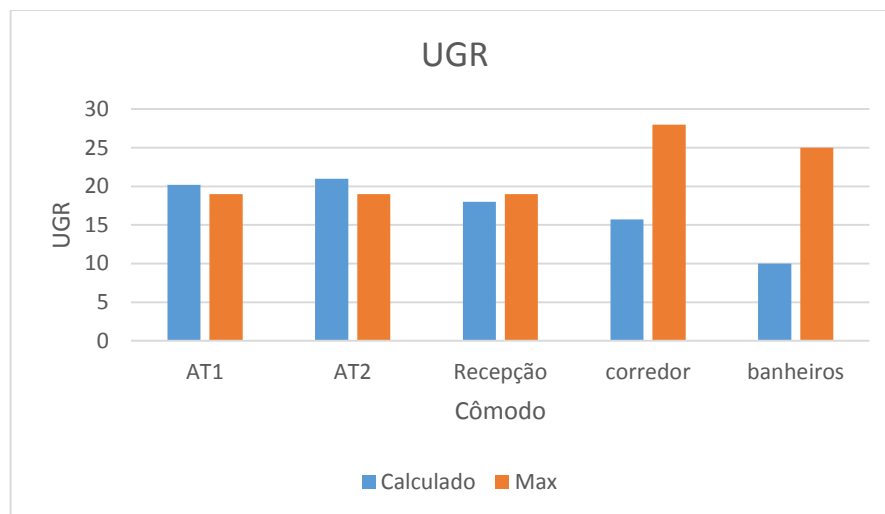


Figura 10 - Simulação do índice de ofuscamento para os cômodos. (Fonte: do autor)

De acordo com os resultados mostrados na figura 7 a 10, o projeto luminotécnico foi considerado adequado para as atividades praticadas nos ambientes no período diurno.

Para o caso do eventual uso noturno da edificação, a iluminação deve ser complementada por luminárias no plano de trabalho, instaladas somente nas mesas que serão usadas durante a noite, para evitar o uso desnecessário de energia elétrica. O projeto elétrico considerou essa possibilidade e para cada estação de trabalho foi instalada uma tomada extra para a alimentação das luminárias.

### 3.1.2 Cargas do sistema de Condicionamento de ar

O projeto do sistema de condicionamento de ar requer diversas informações a respeito da edificação como: perfil de uso, equipamentos, envoltória, além das condições climáticas da região e condições termohigrométricas de projeto. Com estas informações é possível calcular a carga térmica e definir a potência do sistema de ar-condicionado (ASHRAE, 2009).

A carga térmica de resfriamento e desumidificação deve ser calculada para cada zona térmica, em intervalos de tempo necessários para determinar seu pico durante o período de funcionamento do sistema, também deve ser ponderada a inércia térmica inerente a massa de cada recinto. Para edificações com mais de uma zona térmica é indicado o uso de programas computacionais que realizam a análise térmica de edificações (ABNT, 2008).

O *software* utilizado para a simulação higrotérmica da planta piloto foi o *PowerDomus*, desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas Térmicos da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (LST/PUCPR). O *PowerDomus* realiza, dentre outros parâmetros, o cálculo da carga térmica em cada zona térmica para as 8760 horas do ano, a partir da modelagem da edificação e de dados climáticos. (MENDES; OLIVEIRA; SANTOS, 2001)

Para inserção do modelo no *PowerDomus*, cada recinto de uso permanente foi considerado como uma zona térmica, devido aos diferentes perfis de uso, sendo eles: área técnica 1, área técnica 2 e recepção. As janelas, portas e proteções solares também foram incluídas no modelo, como pode ser visto na Figura 11.

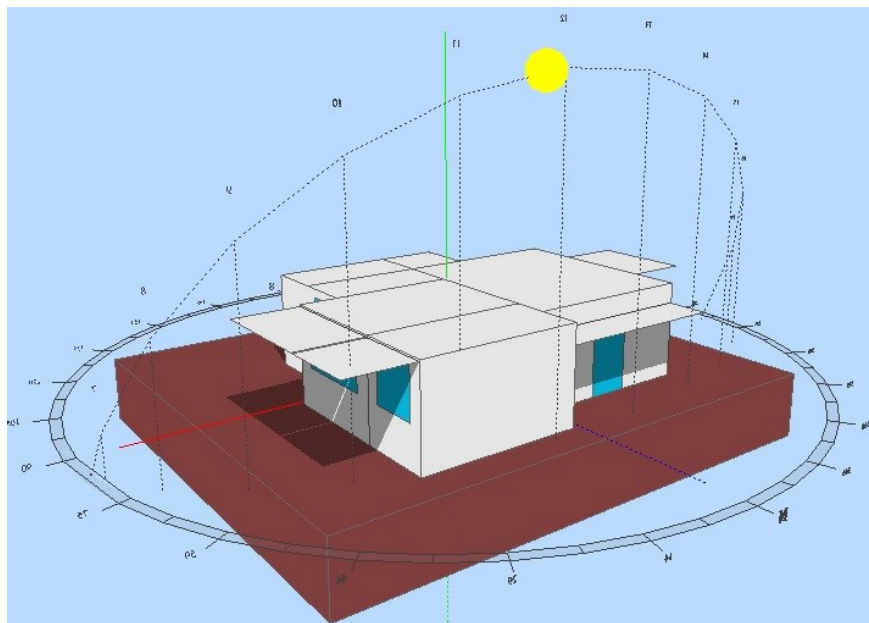


Figura 11 – Modelagem das zonas térmicas no *software PowerDomus*. (Fonte: do autor)

As informações relacionadas à envoltória foram inseridas de acordo com o projeto inicial, respeitando os critérios estabelecidos pelo RTQ-C para o nível A de eficiência energética. Como pode ser observado na figura 11, o telhado da recepção



não foi inserido no modelo, devido à restrição do *software*. Entretanto, a configuração das camadas que compõe a cobertura faz as correções necessárias para a adequação do modelo ao projeto, conforme a NBR 15220-2.

Na tabela 5 podem ser observadas as transmitâncias térmicas das três configurações de parede e duas configurações de cobertura que compõe a envoltória. Na tabela 6 são vistas a transmitância térmica média ponderada pela área das paredes e coberturas da envoltória conforme estabelecido pelo RTQ-C. As informações detalhadas de cada configuração de parede e cobertura que compõe os recintos podem ser encontradas em Espíndola et al. (2016).

**Tabela 5** - Transmitância térmica das paredes e coberturas calculadas segundo a NBR 15220-2.

Tipo	Transmitância (W/m <sup>2</sup> K)
Parede com Lã de Rocha	0,48
Parede comum	1,95
Parede com Fachada Ventilada	1,44
Telhado vegetado	0,27
Telhado metálico	0,39

Fonte: do autor.

**Tabela 6** – Transmitância térmica média das paredes e coberturas

Envoltória	Transmitância (W/m <sup>2</sup> K)
Paredes	0,95
Cobertura	0,32

Fonte: do autor.

Foi atribuído a cada zona térmica um perfil de uso, incluindo os horários de ocupação diário, ao longo do ano, definindo o tipo de atividade que cada pessoa realizará no recinto, e sua respectiva contribuição à carga térmica. O mesmo foi feito para os equipamentos, inserindo os horários de operação e a dissipação térmica correspondente. A contribuição à carga térmica do sistema de iluminação é calculada automaticamente pelo *software*, inserindo a potência instalada e o seu perfil de uso.

As Tabelas de 7 a 9 mostram a potência dissipada respectivamente por, equipamentos, pessoas e iluminação.

**Tabela 7 - Potência dissipada em equipamentos**

Equipamento	Quantidade	Calor sensível(W)	Calor latente(W)	Ref.
Recepção				
Computador	3	55	0	NBR 16401-1
Monitor 19 à 20 pol.	3	80	0	NBR 16401-1
Impressora a Laser	1	320	0	NBR 16401-1
Área Técnica 1				
Computador	1	55	0	NBR 16401-1
Monitor 19 à 20 pol.	1	80	0	NBR 16401-1
Servidor	1	495	0	(DELL, 2016)
No break	1	100	0	(EATON, 2016)
Inversor	1	99.8	0	(ABB, 2016)
Outros	1	100	0	-
Área Técnica 2				
Notebook	7	55	0	(ASHRAE, 2009)

Fonte: do autor.

**Tabela 8 - Calor emitido por pessoas**

Pessoas				
Cômodo	QTD	Calor sensível(W)	Calor latente(W)	Ref.
AT1	2	70	45	(ASHRAE, 2009)
AT2	7	70	45	(ASHRAE, 2009)
Recepção	3	70	45	(ASHRAE, 2009)

Fonte: do autor.

**Tabela 9 - Densidade de potência de iluminação (DPIL).**

Iluminação	
Cômodo	DPIL (W/m <sup>2</sup> )
AT1	8,3
AT2	10,4
Recepção	9,2

Fonte: do autor.

De acordo com ABNT (2008), devem ser previstos para ambientes de ocupação prolongada, sistemas de renovação de ar com intuito de reduzir a concentração no ambiente de poluentes gasosos. A vazão eficaz do ar externo deve ser calculada pela equação 3, para cada ambiente, sendo os fatores  $F_p$  e  $F_a$

definidos de acordo com a tarefa executada e a densidade de ocupação. A vazão calculada deve ser considerada no cálculo da carga térmica (ABNT, 2008).

$$V_{ef} = P_z \times F_p + A_z \times F_a \quad (3)$$

sendo:

$V_{ef}$  A vazão eficaz de ar exterior, em litros por segundo (l/s);

$P_z$  O número máximo de pessoa na zona de ventilação;

$F_p$  A vazão por pessoa, em litros por segundo (l/s\*Pessoa);

$A_z$  A área útil ocupada pelas pessoas (m<sup>2</sup>);

$F_a$  A vazão por área útil ocupada (l/s\*m<sup>2</sup>);

O cálculo apresentado na equação foi realizado para todos os cômodos, de acordo com seu respectivo perfil de ocupação, e o valor de vazão calculado foi inserido no *PowerDomus* para que fosse considerada sua contribuição à carga térmica. A tabela 10 apresenta o valor de vazão necessário para cada cômodo.

**Tabela 10** - Taxa de renovação de ar.

Cômodo	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Trocas/h
AT1	27,93	1,07
AT2	77,9	1,98
Recepção	56,26	0,73

Fonte: do autor.

Por fim, para realizar a simulação é necessário informar ao *software* as condições termohigrométricas de projeto e os dados climáticos da região. De acordo com ASHARE (2003), para a vestimenta relativa a 1 clo, com o ocupante exercendo atividades leves, a temperatura de 24 °C e umidade relativa de 50% proporcionam sensação de conforto térmico a 80% das pessoas. Sendo assim, estas condições foram definidas como padrão para o cálculo da carga térmica.

Os dados climáticos utilizados, são dados horários de temperatura e radiação direta e medias mensais de radiação difusa e umidade relativa, para a cidade de Araranguá, fornecidas pelo próprio *software*.

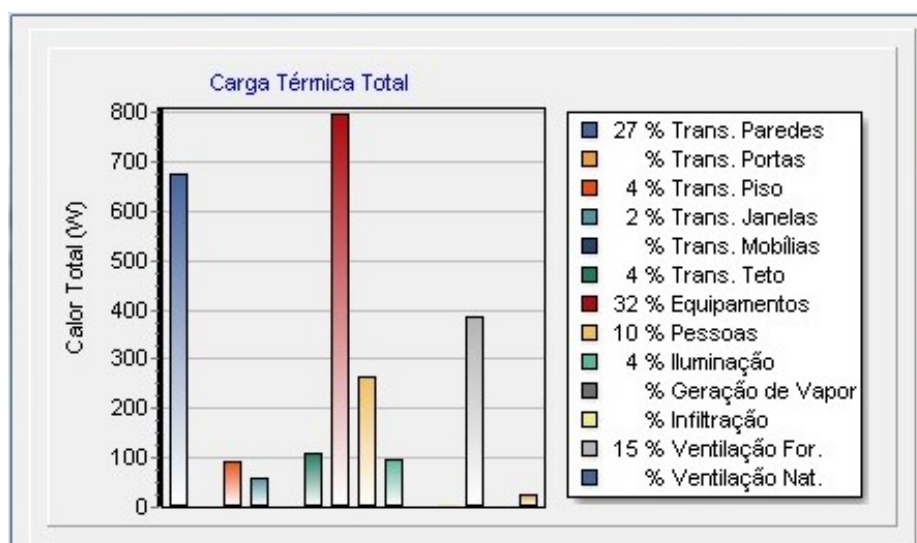
Na tabela 11 podem ser observados os valores das cargas térmicas máximas calculadas pelo *software PowerDomus* para cada zona térmica para o período de uso da edificação.

**Tabela 11** – Carga térmica máxima.

Carga térmica máxima	
Cômodo	Carga térmica (BTU/h)
Área técnica 1	8473,5
Área técnica 2	13560,8
Recepção	11842,8

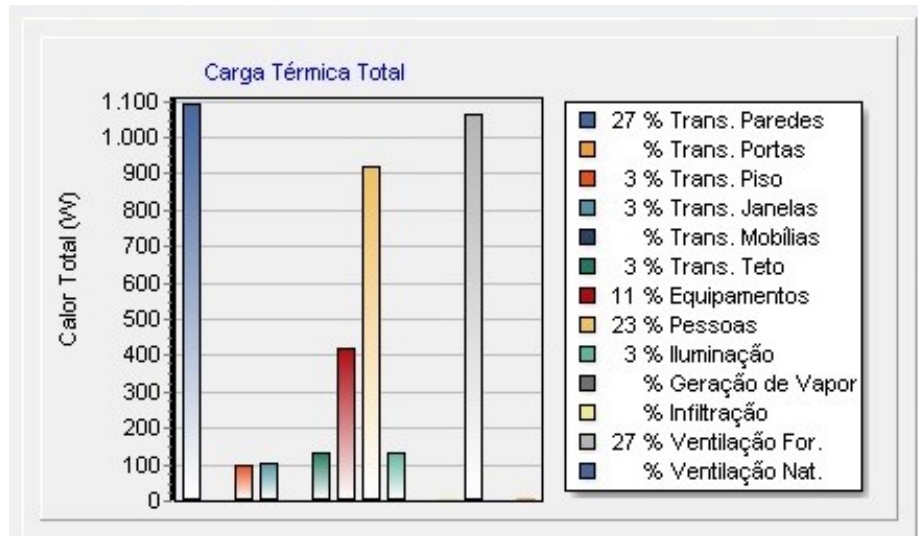
Fonte: do autor.

Um detalhamento da composição da carga térmica para cada zona térmica pode ser visto nas Figuras 12, 13 e 14, geradas pelo *PowerDomus*. Nelas pode-se notar a grande influência da transmissão de calor através das paredes, justificando o rigor do RTQ-C neste quesito. Parte considerável da carga térmica também é oriunda da ventilação forçada, destinada a renovação de ar.

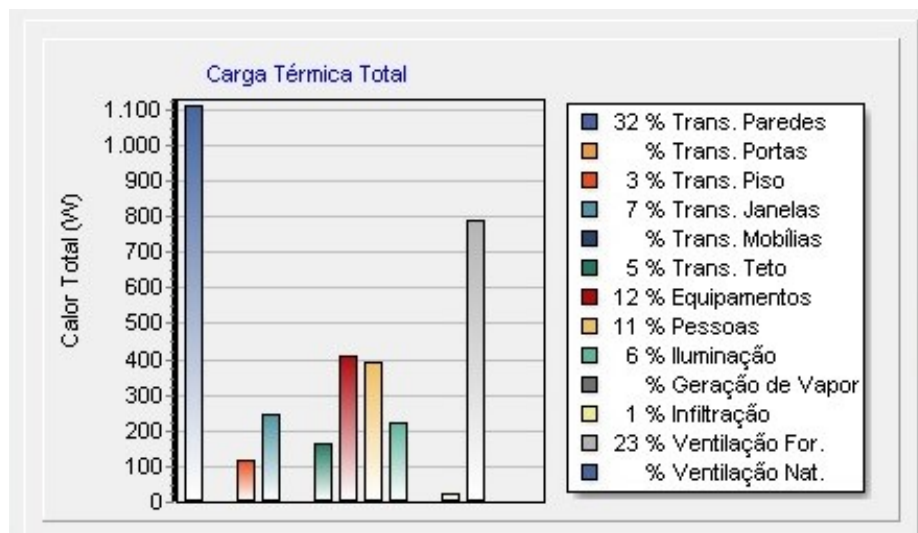


**Figura 12** - Contribuições à carga térmica da Área técnica 1. (Fonte: do autor).





**Figura 13** - Contribuições à carga térmica da Área técnica 2. (Fonte: do autor).



**Figura 14** - Contribuições à carga térmica da Área técnica 3. (Fonte: do autor).

Para o posterior cálculo do consumo de energia, foram escolhidos aparelhos de ar-condicionado comerciais, com o coeficiente de performance (COP) referente ao nível A de eficiência energética do Procel e com capacidade de refrigeração igual ou superior às cargas térmicas calculadas como mostrado na Tabela 12.

**Tabela 12** - Aparelhos de Ar-condicionado comerciais.

Cômodo	Modelo	Marca	Capacidade (BTU/h)	Potência elétrica (W)	COP	ENCE
AT1	GWCN09JAND1A1A/I	GREE	9000	810	3,26	A
AT2	GWC12MB-D1NNA3C/	GREE	13000	1175	3,24	A
Recepção	GWC12MB-D3NNA5E/I	GREE	12000	1085	3,24	A

Fonte: do autor .

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção utilizará os resultados de potência instalada de iluminação e ar-condicionado dimensionados na seção anterior, em conjunto com as demais cargas elétricas da planta piloto para estimar o consumo de energia anual da edificação. Com a informação do consumo anual de energia elétrica, será dimensionado um sistema fotovoltaico conectado à rede para suprir integral ou parcialmente o referido consumo se adequando ao sistema de compensação de energia regulamentado pela resolução normativa da ANEEL que dá providências sobre micro e minigeração distribuída de energia.

### 4.1 Simulação do Consumo de energia elétrica

O consumo de energia elétrica anual foi estimado a partir da inserção das cargas elétricas e seus respectivos perfis de uso no já citado *software PowerDomus*.

A Tabela 13 mostra todos os equipamentos consumidores de energia incluindo aparelhos de ar-condicionado e sistema de iluminação elétrica da planta piloto, totalizando um potência instalada de 7046,9W, sendo 886,9W do sistema de iluminação, 3090W dos equipamentos e 3070W dos aparelhos de ar-condicionado.

A distribuição percentual por subsistema da potência instalada pode ser observada na Figura 15.

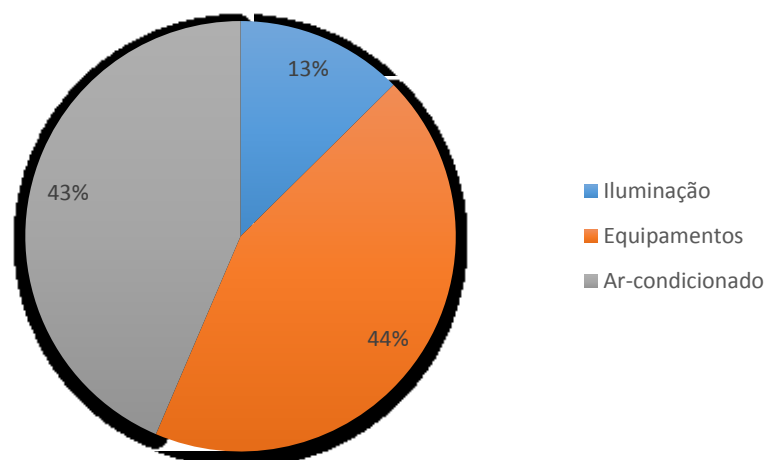


Figura 15 - Distribuição da potência instalada. (Fonte: do autor).

**Tabela 13 - Aparelhos Consumidores de energia elétrica**

Equipamento	Quantidade	Potência (W)	Total
Recepção			
Computador	3	55	165
Monitor 19 à 20 pol.	3	80	240
Impressora a Laser	1	320	320
Ar-condicionado	1	1085	1085
Iluminação	4	55,9	223,6
Área Técnica 1			
Computador	1	55	55
Monitor 19 à 20 pol.	1	80	80
Servidor	1	495	495
No break	1	100	100
Outros	1	100	100
Ar-condicionado	1	810	810
Iluminação	3	31,9	95,7
Área Técnica 2			
Notebook	7	55	385
Ar-condicionado	1	1175	1175
Iluminação	4	31,9	127,6
Demais cômodos e área externa			
Iluminação	5	15	75
Refletores	4	80	320
Arandelas	3	15	45
Geladeira	1	200	200
Cafeteira	1	800	800
Bebedouro	1	150	150

Fonte: do autor .

Uma vez levantada a potência instalada, os dados foram inseridos no *software PowerDomus* para a simulação energética da edificação. Através do cálculo da temperatura interna o *software* determina o período em que o sistema de ar-condicionado atua para condicionar o ar ambiente, estimando com precisão o consumo de energia elétrica nestes aparelhos (MENDES; OLIVEIRA; SANTOS, 2001).

O consumo mensal de energia é mostrado na Tabela 14. Como o objetivo da estimativa do consumo de energia é fornecer dados para o dimensionamento do sistema fotovoltaico, é importante a análise mensal da demanda por energia elétrica,

para que posteriormente seja possível comparar a curva de geração do sistema fotovoltaico com a de consumo de energia elétrica.

**Tabela 14** - Consumo mensal de energia elétrica por subsistema .

Mês	ilum.(KW/h)	Equip. (KW/h)	Resf. (KW/h)	Total (KW/h)
Janeiro	0	442,8	0	442,8
Fevereiro	70,73	600,53	211,12	882,38
Março	81,35	672,69	238,98	993,02
Abril	78,41	648,64	168,18	895,23
Mai	74,28	654,87	121,84	850,99
Junho	77,81	648,63	60,35	786,79
Julho	77,81	663,78	51,38	792,97
Agosto	77,81	663,78	89,68	831,27
Setembro	77,81	649,43	99,6	826,84
Outubro	74,28	654,87	127,94	857,09
Novembro	77,81	648,91	233,22	959,94
Dezembro	45,97	572,28	122,49	740,74
Total	814,07	7521,21	1524,78	9860,06

Fonte: do autor .

Na Figura 16 pode-se observar a sazonalidade do consumo de energia elétrica. A variação ocorre devido ao perfil de uso e principalmente devido a variação da carga térmica ao longo do ano, o que faz variar o consumo de energia elétrica do sistema de ar condicionado no período do inverno. Cabe ressaltar que o sistema de condicionamento de ar apenas resfria o ar interno, não promovendo o aquecimento do ambiente nos períodos de menor temperatura.

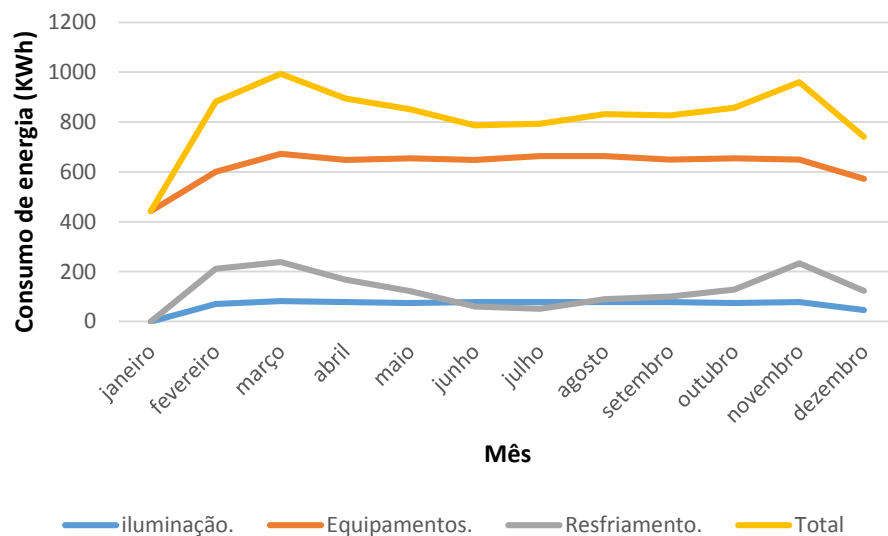


Figura 16 – Sazonalidade do consumo de energia elétrica. (Fonte: do autor)

A Figura 17 apresenta a distribuição do consumo de energia por subsistema.

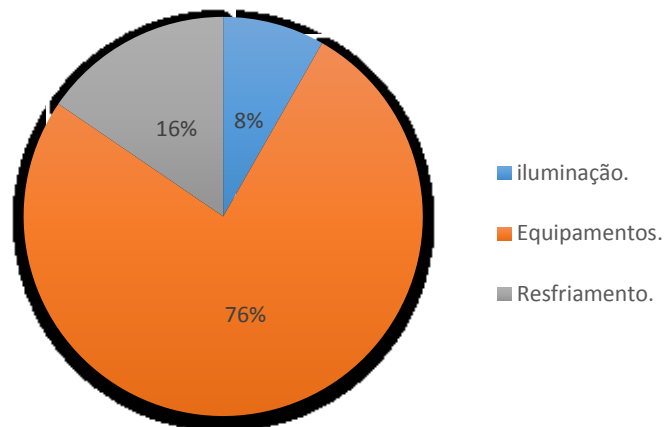


Figura 17 - Distribuição do consumo de energia elétrica. (Fonte: do autor)

Comparando as Figuras 15 e 17 pode-se observar que, apesar da potência instalada dos equipamentos e do sistema de ar-condicionado serem praticamente iguais, o consumo de energia dos dois subsistemas ao longo de um ano é bastante diferente. O perfil de consumo da edificação também diverge do publicado por Procel (2008), afirmando que em média, para o ano de 2005, o sistema de iluminação foi responsável por 18,8% do consumo total de energia elétrica em sistemas de iluminação das edificações comerciais e de 40,3% o consumo em sistemas de climatização. Isto pode indicar a eficácia da efficientização desses sistemas proposta pelo RTQ-C e implantados na planta piloto.

#### **4.2 Dimensionamento do sistema fotovoltaico**

Uma vez estimado o consumo mensal de energia elétrica, é possível dimensionar o sistema fotovoltaico, para tal, é necessário identificar as áreas disponíveis para a implantação do sistema e estimar o potencial de geração de energia solar fotovoltaica da região à partir de dados climáticos, feito isto, pode-se determinar a potência a ser instalada e identificar possíveis limitantes do sistema. Uma vez estabelecida a potência final do sistema, uma simulação pode ser realizada para cruzar informações de geração e consumo de energia elétrica, bem como calcular indicadores de eficácia do sistema fotovoltaico (PINHO e GALDINO, 2014).

Esta metodologia foi utilizada para projetar o sistema fotovoltaico da planta piloto e está detalhada nas subseções seguintes.

A simulação do sistema foi realizada no *software* SAM (*System Advisor Model*) desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) nos Estados Unidos que realiza simulações de sistemas fotovoltaicos com dados climáticos horários ao longo de um ano (NREL, 2016).

#### 4.2.1 Definição dos dados meteorológicos

O projeto está localizado na cidade de Araranguá no estado de Santa Catarina, na latitude de  $-28^{\circ} 56'$  e longitude  $-49^{\circ} 29'$

O *software* SAM possui em seu banco de dados informações climáticas de diversas regiões do Brasil. Entretanto, o programa não possui dados climáticos para a cidade de Araranguá, sendo a cidade mais próxima contida em seu banco de dados, Florianópolis-SC, distante cerca de 200km.

O SAM permite a inserção de arquivos climáticos gerados pelo usuário, porém, uma análise feita através do *software* para cálculo de radiação solar Radiasol (RADIASOL 2, 2016), mostrou que a diferença da média anual da irradiação média diária global horizontal entre Araranguá e Florianópolis é de  $0,182 \text{ kWh/m}^2$ , cerca de 4,2%. A mesma análise realizada para a radiação global inclinada, para uma inclinação de  $25^{\circ}$ , mostrou uma diferença de 3,3% entre as cidades. Esta diferença é considerada muito pequena, uma vez que a incerteza entre diferentes fontes de dados de radiação solar para uma mesma cidade pode atingir uma diferença de até 15%, como mostrado em Pinho e Galdino (2014).

Dessa forma, foi considerado razoável utilizar os dados climáticos da cidade de Florianópolis para a simulação do sistema fotovoltaico.

A Tabela 15 mostra as principais variáveis climáticas da cidade de Florianópolis, fornecidos pelo *software* SAM.

**Tabela 15** - Média anual da irradiação, temperatura e velocidade de vento para Florianópolis.

Radiação Global	5,89 kWh/m <sup>2</sup> /dia
Radiação Direta	3,9 kWh/m <sup>2</sup> /dia
Radiação difusa	1,99 kWh/m <sup>2</sup> /dia
Temperatura Média	20,7 °C
Média da velocidade de vento	3,3 m/s

Fonte: do autor.



#### 4.2.2 Estimativa da potência necessária

A potência instalada do sistema fotovoltaico pode ser estimada pela equação 4, adaptada de Pinho e Galdino (2014).

$$P_{mp} = \frac{E_c \times G}{I \times PR} \quad (4)$$

Onde:

$E_c$  – Energia anual de consumo (kWh/ano)

$G$  – Irradiância de referência (1 kW/m<sup>2</sup>)

$I$  – Irradiação anual no plano dos módulos (kWh/m<sup>2</sup>/ano)

$PR$  – *Performance Ratio* (Razão de desempenho, adimensional)

De acordo com Dias et. al., 2007, o coeficiente ou razão de desempenho para sistemas fotovoltaicos conectados à rede para as capitais do sul do Brasil é de aproximadamente 0,84.

Para a energia anual consumida, obtida na seção 4.1, e a irradiação anual inclinada para o ângulo de 25° no valor de 1729,2 kWh/m<sup>2</sup> estima-se que a planta precisa de aproximadamente 6,78 kWp de potência instalada.

Considerando a utilização de módulos com 15% de eficiência, pode-se estimar a área total dos módulos do sistema fotovoltaico. Deste modo, a área necessária para a instalação do sistema é aproximadamente 45,2 m<sup>2</sup>.

#### 4.2.3 Condições arquitetônicas

A planta piloto possui um telhado projetado para receber o sistema fotovoltaico. Gasparin e Krenzinger (2016) mostraram que a inclinação ótima para sistemas fotovoltaicos, do ponto de vista da maximização da geração de energia anual, é igual a latitude do local - para Araranguá 28° - e voltado ao norte geográfico, entretanto, o mesmo estudo mostra que variações de inclinação de até ± 5° acarretam em variações desprezíveis de irradiação anual no plano dos módulos. Assim, foi possível conciliar aspectos arquitetônicos e de geração de energia solar fotovoltaica ao projeto da planta piloto, optando-se pela inclinação de 25° do telhado, como mostrado na Figura 18 (ESPÍNDOLA,2016).

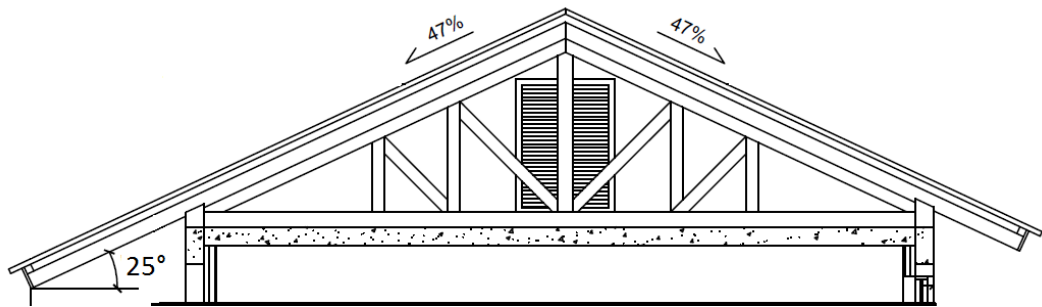


Figura 18 - Inclinação do Telhado Metálico

Como visto na figura 19, a face norte do telhado metálico possui 31,8 m<sup>2</sup> disponíveis para instalação do sistema fotovoltaico, mostrando-se como um limitante do sistema, tendo em vista os 45,2 m<sup>2</sup> necessários para suprir inteiramente a demanda energética.

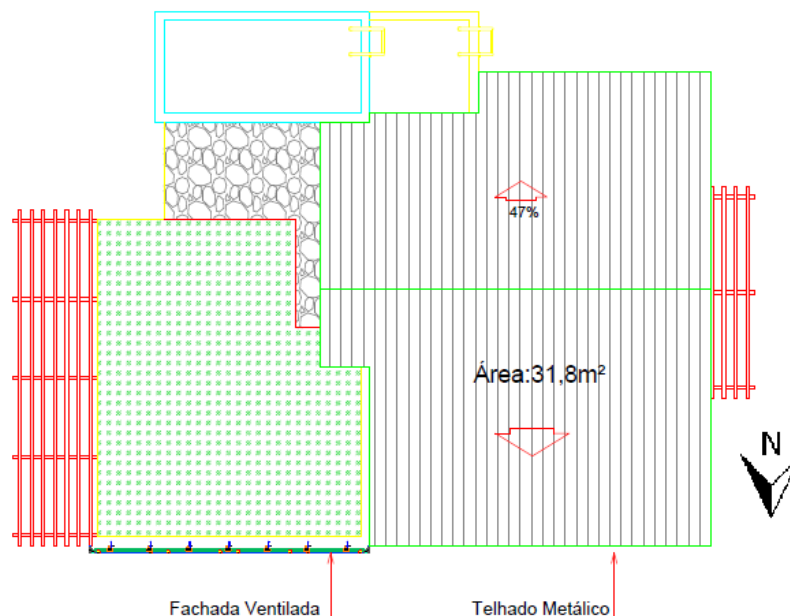


Figura 19 - Área disponível de telhado

Como citado anteriormente, a planta piloto foi construída para a aplicação da cerâmica fotovoltaica desenvolvida durante o projeto de P&D. Para isto, foi construída uma fachada ventilada composta por 28 cerâmicas de 1,2 X 0,60m cada, totalizando uma área de 20,2m<sup>2</sup> como mostrado na figura 20.

A fachada ventilada está orientada a norte com ângulo de inclinação de 90°. Com isto, a irradiação anual em relação ao ângulo ótimo tem uma redução de aproximadamente 44% para latitudes próximas a da cidade de Araranguá (GASPARIN; KRENZINGER, 2016).

Como, apesar de parte da área da fachada ventilada ser suficiente para complementar a área do telhado e atingir o total calculado na seção 4.4.2, a redução da irradiação solar incidente faz com que seja necessária a utilização de toda sua área para a instalação do sistema fotovoltaico.

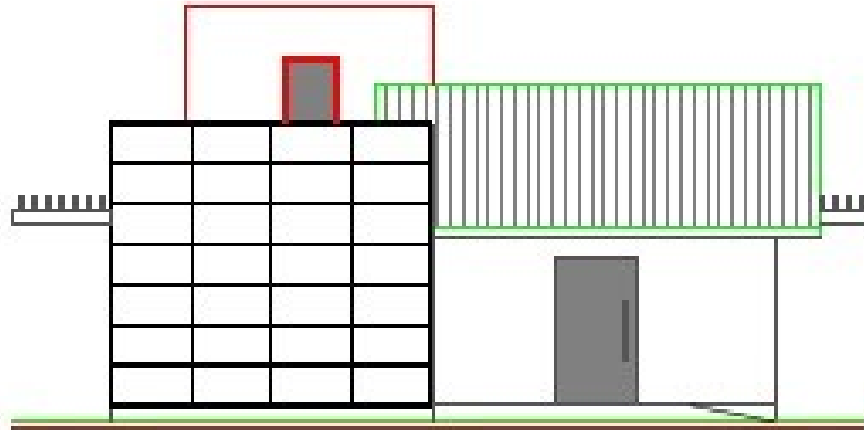


Figura 20 - Área disponível de Fachada Ventilada

#### 4.2.4 Escolha dos Módulos Fotovoltaicos

A geração de energia solar fotovoltaica da planta piloto, foi dividida em dois subsistemas independentes, o do telhado e o da fachada ventilada.

O sistema fotovoltaico está sendo limitado pelas áreas disponíveis para sua instalação, então, para o subsistema do telhado, buscou-se por módulos cujas dimensões maximizassem a área ocupada e ao mesmo tempo sejam certificados pelo INMETRO com o nível A de eficiência energética.

O módulo CS6P-245M da marca Canadian Solar mostrou a melhor taxa de ocupação do telhado, maximizando a potência instalada. Com as dimensões 1,638 X 0,982 m, é possível instalar até 17 módulos do telhado. Entretanto, como mostrado na Figura 24, uma pequena área do telhado é sombreada no período da manhã, além disto, a associação elétrica de números ímpares de módulos não permite a associação de duas *strings* em paralelo sem maiores perdas por descasamento elétrico. Sendo assim o sistema proposto para o telhado contém 16 módulos de silício monocristalino de 245 Wp totalizando 3920 Wp de potência instalada.

A Figura 21 mostra as características e a curva IxV do módulo acima citado extraído do *software* SAM.

#### Module Characteristics at Reference Conditions

Reference conditions: Total Irradiance = 1000 W/m<sup>2</sup>, Cell temp = 25 C

Nominal efficiency	15.8249 %	Temperature Coefficients	
Maximum power (Pmp)	245.127 Wdc	-0.442 %/°C	-1.083 W/°C
Max power voltage (Vmp)	30.3 Vdc		
Max power current (Imp)	8.1 Adc		
Open circuit voltage (Voc)	37.4 Vdc	-0.342 %/°C	-0.128 V/°C
Short circuit current (Isc)	8.6 Adc	0.050 %/°C	0.004 A/°C

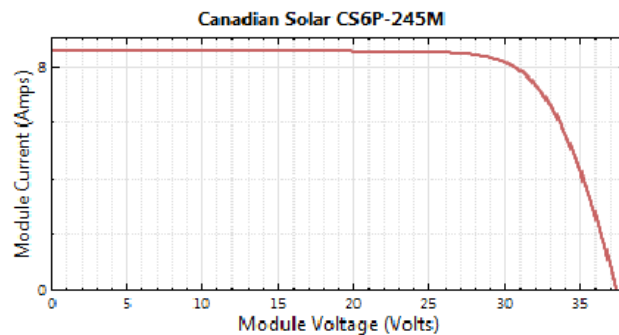


Figura 21 - Características do módulo CS6P-245M - Canadian Solar

A cerâmica fotovoltaica a ser aplicada na fachada ventilada foi desenvolvida no Laboratório de Pesquisa Aplicada (LPA-UFSC) e consiste em um módulo fotovoltaico de 110 Wp semi-flexível com células de silício monocristalino encapsuladas com EVA e cobertas com filme polimérico, integrado à cerâmica (Figura 22).

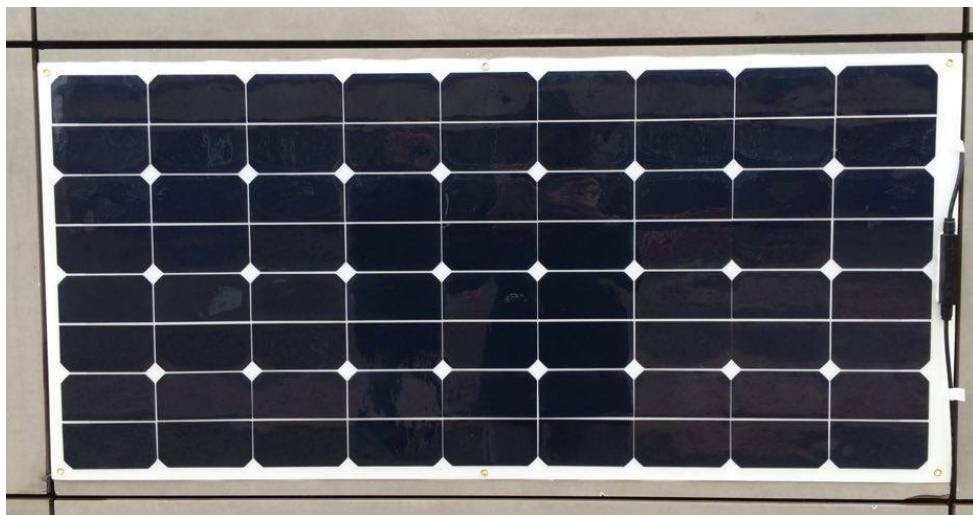


Figura 22 - módulo fotovoltaico semi-flexível com células de silício monocristalino encapsuladas e cobertas com filme polimérico, integrado à cerâmica. (Fonte: do autor).

Um modelo do módulo foi gerado no *software* SAM a partir da inserção de suas características elétricas e físicas. O *software* gera a curva IxV do módulo, que pode ser vista junto com as características elétricas na Figura 23.

O subsistema proposto para a fachada possui 28 cerâmicas fotovoltaicas de 110Wp cada, totalizando 3080Wp de potência instalada.

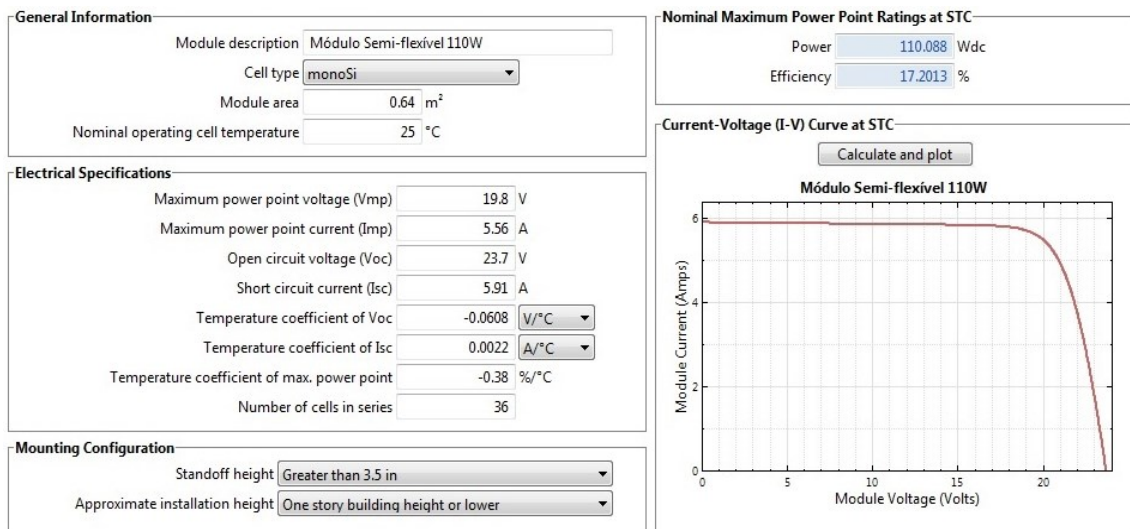


Figura 23 - Características elétricas da cerâmica fotovoltaica. (Fonte: do autor)

Por fim, pode-se observar os dois subsistemas propostos que juntos somam 7000 Wp de potência instalada, e suas respectivas alocações na planta piloto na figura 24.

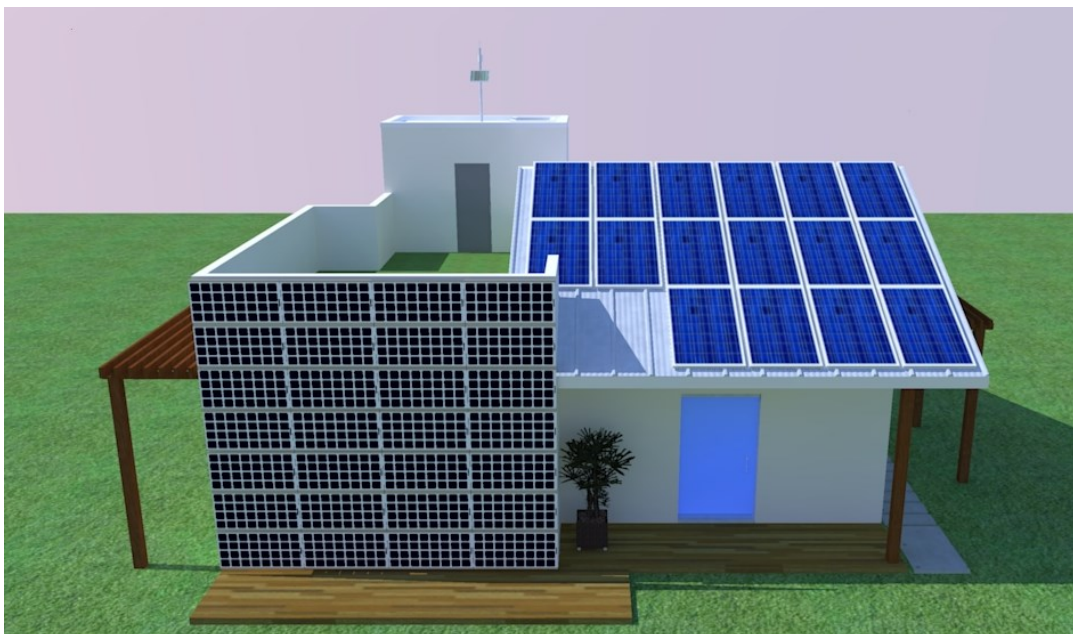


Figura 24 - Sistema fotovoltaico da planta piloto. (Fonte: do autor).

#### 4.2.5 Escolha do inversor de frequência

Para cada subsistema foram realizadas três simulações com inversores de frequência diferentes a fim de encontrar o melhor Fator de Dimensionamento do

inversor (FDI) e assim definir a potência do inversor mais adequada para cada subsistema.

O arranjo dos módulos fotovoltaicos do subsistema do telhado foi simulado com os módulos definidos na seção 4.2.4 e arranjados como visto na figura 25, nela pode-se observar que oito módulos foram ligados em série, formando uma série de módulos (*String*) e duas séries de módulos foram associadas em paralelo, formando o arranjo do subsistema.

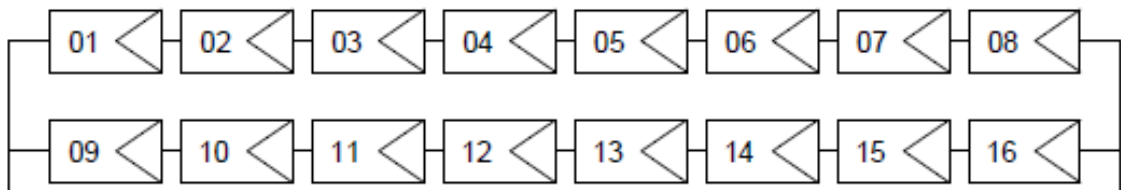


Figura 25 - Arranjo dos módulos subsistema do telhado. (Fonte: do autor).

As características elétricas do arranjo são mostradas na Tabela 16, e foram calculadas à partir das características do módulo descrito na Figura 21.

Todos os inversores simulados foram selecionados de modo que as tensões e correntes do arranjo não excedam os limites do inversor, e a tensão do ponto de máxima potência esteja dentro dos limites de tensão do seguidor do ponto de máxima potência do inversor.

**Tabela 16** - Características elétricas do subsistema do telhado.

Arranjo	
Pmp	3,922 kW
Número de módulos	16
Módulos por <i>String</i>	8
<i>String</i> em paralelo	2
<i>String</i> Voc	299,2 Vcc
<i>String</i> Vmp	242,4 Vcc
Array Imp	16,2 A
Array Isc	17,2 A

Fonte: do autor.

A Tabela 17 apresenta as características elétricas dos três inversores simulados. As informações foram retiradas do banco de dados do *software* SAM.

**Tabela 17** - Características elétricas dos inversores simulados para o subsistema do telhado.

Parâmetros	Inversor 1	Inversor 2	Inversor 3
Eficiência (%)	95,7	96,0	95,7
Máxima Potência CA (KW)	3,8	3,3	2,5
Máxima Potência CC (KW)	3,95	3,4	2,6
Consumo em Operação (W)	27,9	24,2	27,5
Consumo Noturno (W)	0,2	0,1	0,4
Tensão Nominal CA (V)	240	208	240
Máxima Tensão CC (V)	600	520	520
Máxima corrente CC (A)	32,0	25,0	12,8
Mínimo MPPT (V)	140	140,0	205
Tensão CC Nominal (V)	340,8	310,4	339,5
Max. MPPT (V)	530,0	520,0	470
FDI	0,97	0,84	0,64

Fonte: do autor

Através dos índices de mérito técnico, calculados pelo SAM para o período anual, pode-se avaliar a influência do fator de dimensionamento do inversor no sistema e definir a potência do inversor mais adequada, do ponto de vista técnico.

A Figura 26 apresenta o fator de capacidade (FC), a produtividade final (YF) e o desempenho global (PR) para cada fator de dimensionamento para o subsistema descrito.

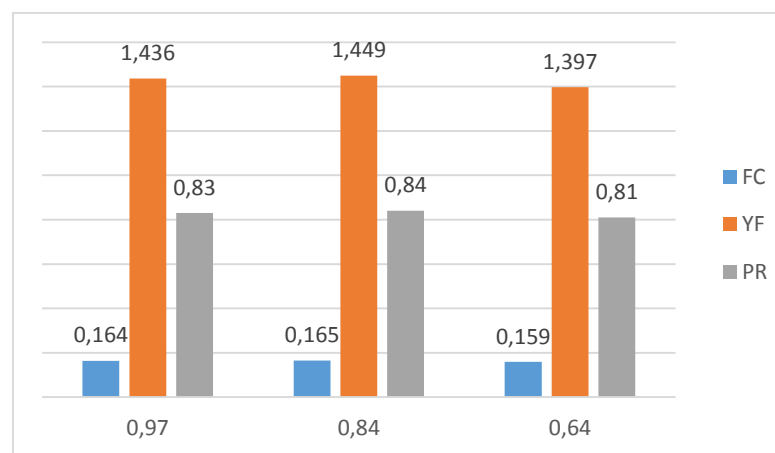


Figura 26 - Índices de mérito técnico em função do FDI do subsistema telhado. (Fonte: do autor.)

Como observado na Figura 26, o fator de dimensionamento de 0,84 mostrou o melhor índice de produtividade anual – 1,449 MWh/kWp – o melhor índice de desempenho – 0,84 – e o melhor fator de capacidade – 16,5% – mostrando-se como



o FDI ótimo dentre os valores simulados e em conformidade com o descrito por Rampinelli (2010).

De acordo com Macêdo (2006), o inversor com fator de dimensionamento alto faz com que seja mais frequente a operação do sistema em condições de menor eficiência do inversor, enquanto que para fatores de dimensionamento baixos, o inversor limita mais frequentemente a potência gerada (*Clipping*), por esta atingir o limite nominal do inversor.

As figuras 27a e 27b mostram respectivamente os cortes de potência realizados pelo inversor para o FDI de 0,84 e 0,65.

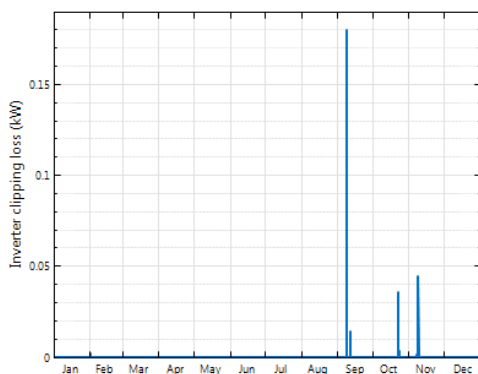


Figura 27: a - *Clipping* FDI 0,84 (Fonte: do autor.)

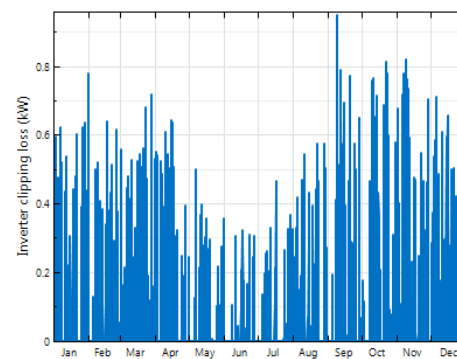


Figura 27: b - *Clipping* FDI 0,64 (Fonte: do autor.)

Do mesmo modo que o sistema proposto para o telhado, o subsistema da fachada ventilada foi simulado para diversos fatores de dimensionamento.

A Figura 28 mostra o arranjo do subsistema proposto para a fachada. Como os módulos têm menores valores de tensão do ponto de máxima potência e circuito aberto, foi possível associar um maior número de módulos em série, sem exceder os limites dos inversores.

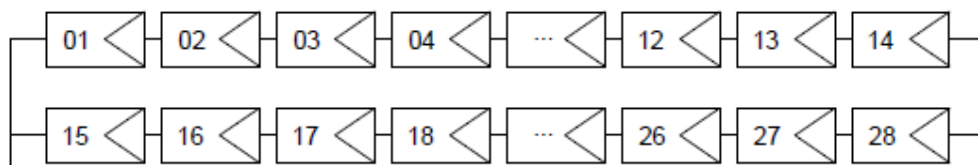


Figura 28 - Arranjo dos módulos subsistema da Fachada ventilada. (Fonte: do autor)

Na Tabela 18 são apresentados os valores referentes às características elétricas do arranjo fotovoltaico citado.

**Tabela 18** - Características elétricas do subsistema da Fachada ventilada.

<i>Array</i>	
Pmp	3082 W
Número de módulos	28
Módulos por <i>string</i>	14
<i>String</i> em paralelo	2
<i>String</i> Voc	331,8 V
<i>String</i> Vmp	277,2 V
<i>Array</i> Imp	11,12 A
<i>Array</i> Isc	11,82 A

Fonte: do autor

A tabela 19 mostra as características elétricas dos três inversores simulados para o subsistema proposto para a fachada ventilada.

**Tabela 19** - Características elétricas dos inversores simulados para o subsistema da fachada ventilada.

Parâmetros	Inversor 1	Inversor 2	Inversor 3
Eficiência (%)	96,0	95,7	94,7
Máxima Potência CA (KW)	3,0	2,5	2,0
Máxima Potência CC (KW)	3,2	2,6	2,10
Consumo em Operação (W)	19,9	27,5	16,96
Consumo Noturno (W)	0,1	0,4	0,9
Tensão Nominal CA (V)	240	240	240
Máxima Tensão CC (V)	600	520	420
Máxima corrente CC (A)	20,0	12,8	17,8
Mínimo MPPT (V)	160,0	205	120
Tensão CC Nominal (V)	340,8	339,5	260
Max. MPPT (V)	530,0	470	335
FDI	0,97	0,81	0,65

Fonte: do autor.

Na Figura 29 pode ser observado o resultado dos índices de mérito técnico simulados para o subsistema da fachada ventilada para os três fatores de carregamento.

Como apresentado, o FDI de 0,97 apresentou os melhores índices de mérito técnico dentre as demais configurações. Entretanto, como a diferença da produtividade entre os sistemas é muito pequena e os inversores não possuem, apesar de próximas, a mesma eficiência e consumo próprio, a escolha do fator de dimensionamento, e assim, do inversor, através dos índices de mérito técnico não se mostram conclusivas.

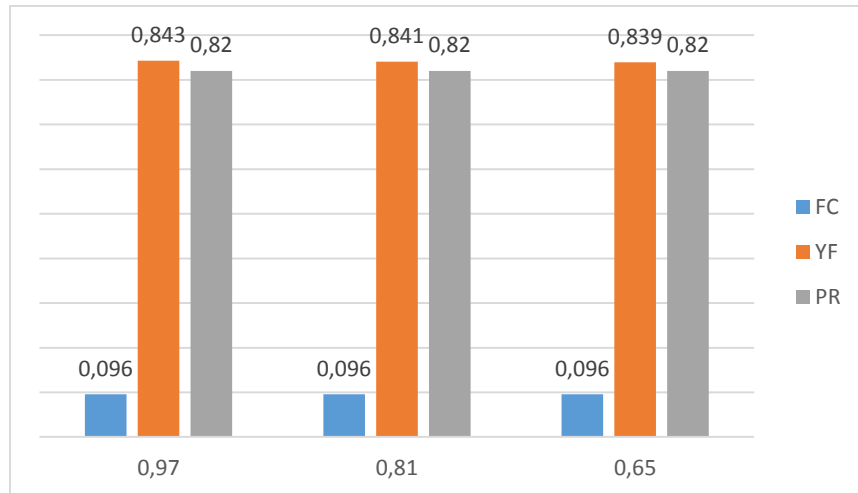


Figura 29 - Índices de mérito técnico em função do FDI do subsistema Fachada. (Fonte: do autor)

Uma análise da potência horária gerada pelo arranjo fotovoltaica mostra, como visto na Figura 30, que o seu pico anual atingiu o valor de aproximadamente 2,5 kW, mostrando que o FDI de 0,97 sobredimensiona o inversor em todos os períodos do ano e o FDI de 0,81 sobredimensiona o inversor na maior parte do tempo.

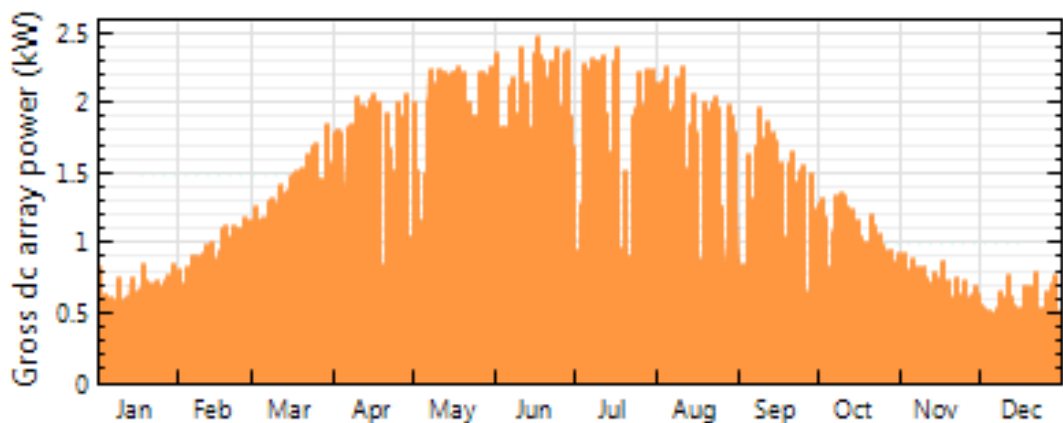


Figura 30 - Potência horária CC ( Fonte: do autor).

Ao se analisar os cortes de potência realizado pelo inversor, para o FDI de 0,65, nota-se que uma pequena parcela da potência gerada durante o ano é inutilizada pelo inversor, somando apenas 0,16% do total da energia anual gerada, como visto nas Figuras 31 e 32, mostrando que o fator de dimensionamento de 0,65 é adequado ao sistema.

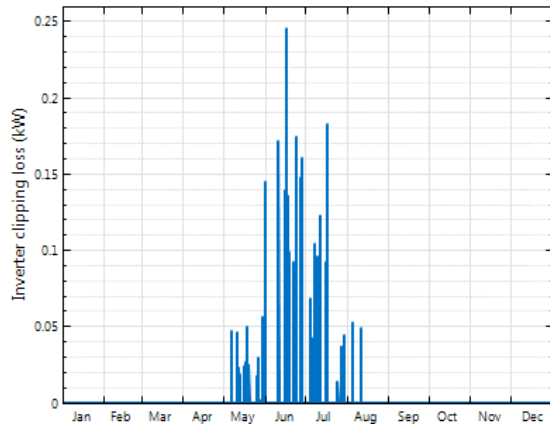


Figura 31 - Clipping FDI 0,65 (Fonte: do autor)

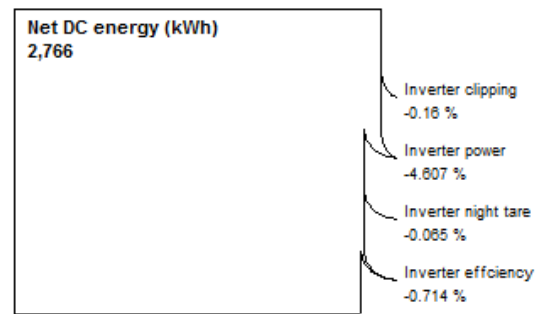


Figura 32 - Perdas por Clipping FDI 0,65 (Fonte: do autor)

#### 4.2.6 Análise de dados

De acordo com os dimensionamentos mostrados na seção 4.2.4 e 4.2.5 foi possível simular os sistemas fotovoltaicos propostos para a fachada e telhado a fim de estimar a geração elétrica anual dos dois sistemas.

A Figura 33 mostra as curvas de geração e consumo de energia elétrica da planta piloto.

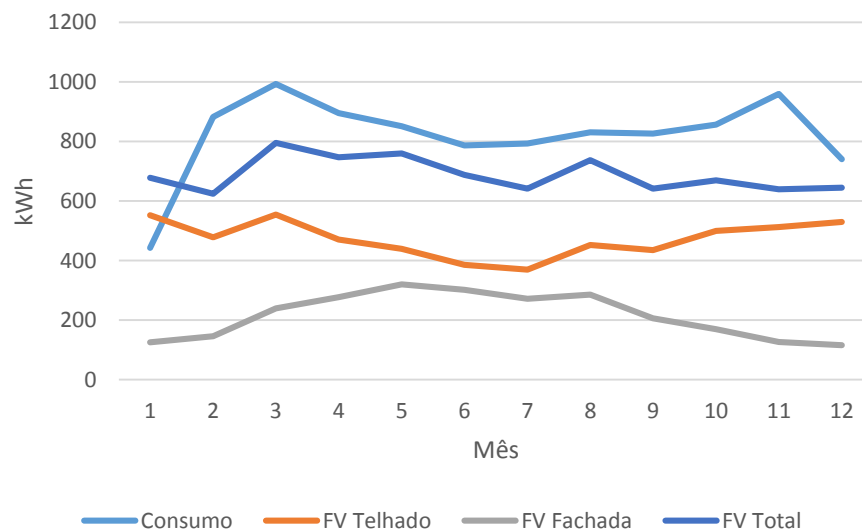


Figura 33 - Curvas de consumo x geração de energia elétrica. (Fonte: do autor)

A geração anual dos dois sistemas fotovoltaicos é de 8270 KWh, que corresponde a 84% do consumo anual de energia elétrica estimada para a planta piloto. Os índices de mérito técnico mostrados na Tabela 20 são indicadores comparativos entre os dois sistemas.

**Tabela 20** - Índices de mérito técnico.

	Telhado	Fachada	
Energia anual	5683	2587	kWh
FC	16,5	9,6	%
Produtividade YF	1449	839	kWh/kWp
PR	0,84	0,82	-
FDI	0,84	0,65	-

Fonte: do autor.

O fator de capacidade do subsistema da fachada apresentou o valor de 9,6% enquanto o do telhado atingiu o valor médio de 16,5%. Tendo em vista que o fator de capacidade, de acordo com Almeida (2012), representa o aproveitamento em termos de geração de energia do sistema fotovoltaico. A menor incidência de irradiação solar no plano da fachada acaba por subutilizar a potência instalada, sendo equivalente a dizer que o sistema operou por um curto período de tempo a potência nominal, se comparado ao seu potencial de geração, de acordo com a potência instalada. O fator de capacidade típico para o sul do Brasil, segundo Almeida (2012), é de 14,2% para a inclinação ótima, mostrando que a inclinação de 90° aproveita pouco o recurso solar enquanto o sistema a inclinação de 25° tem um melhor aproveitamento do recurso.

A partir do desempenho global (PR) pode-se comparar os dois subsistemas do ponto de vista das perdas e falhas, uma vez que este índice normaliza a produtividade em relação a irradiação solar. Sendo assim, o subsistema da fachada apresentou menor desempenho global, o que pode ser atribuído principalmente a menor eficiência do inversor e as perdas pelo corte de potência do inversor, devido ao seu fator de dimensionamento.

As produtividades dos dois sistemas mostraram fortes diferenças, sendo que a produtividade final do subsistema da fachada ventilada é cerca de 42% inferior ao subsistema do telhado. Isto representa a diferença de irradiação solar entre as duas inclinações, uma vez que o índice de produtividade é fortemente influenciado pela disponibilidade do recurso solar. Valores típicos de produtividade para o sul do Brasil são da ordem de 1250 kWh/kWp mostrando a baixa produtividade do sistema da fachada ventilada e o bom dimensionamento do sistema do telhado (ALMEIDA, 2012).

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o dimensionamento dos sistemas de iluminação e ar-condicionado de uma planta piloto com arquitetura bioclimática na cidade de Araranguá – SC para a posterior simulação do consumo anual de energia elétrica e projeto de um sistema fotovoltaico conectado à rede para suprimento do consumo de energia elétrica da edificação.

A simulação do consumo de energia mostrou uma densidade de consumo de energia elétrica relativamente alta, que pode ser atribuída aos equipamentos que funcionam continuamente e não tem margem para implantação de medidas de eficiência energética.

A alta densidade de consumo de energia elétrica implicou no não atendimento completo, pelo sistema fotovoltaico, da demanda por energia elétrica da planta piloto, apesar de terem sido aproveitadas todas as áreas tecnicamente viáveis para implementação destes sistemas.

### **Energetic simulation of a pilot plant with bioclimatic architecture elements and distributed generation using photovoltaic systems.**

#### **ABSTRACT**

Aiming to reduce the environmental and economic impact caused by electrical power in buildings, actions promoting energy efficiency architecture and distributed generation are becoming increasingly more relevant. For being a relative new solution to be applied in Brazil, some difficulties appears to elaborate projects that include these solutions. This paper has as objective to introduce tools to help in energy efficiency projects in buildings combining to distributed generation using photovoltaic systems. To achieve this, a pilot plant with bioclimatic architecture and A rating in power efficiency project was used as example. The pilot plant was built in the city of Araranguá - Brazil presenting Dialux, *PowerDomus* and *Sam softwares*, used to scale out and simulate the project. This work presents the design and simulation of the lighting system, air conditioning system and photovoltaic system. The building integrated photovoltaic system generates 84 % of electricity consumption.

## REFERÊNCIAS

ABB. **ABB string inverters PVI-3.0/3.6/4.2-TL-OUTD 3 to 4.2 kW**. Disponível em: <<http://www.abb.com.br/>>. Acesso em: 17 maio 2016.

ALMEIDA, Marcelo Pinho. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2012. 171 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2003.

ASHRAE. **ASHARE handbook fundamentals**. Atlanta, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 8595-1: **Iluminação em ambientes de trabalho Parte1: Interior**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **16401-1**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projeto das instalações. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **16401-3**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro, 2008.

BRASILIA. Aneel. Agência Nacional de Energia Eletrica. **Geração distribuída**. 2016. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset\\_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introducao-1/656827?inheritRedirect=false](http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introducao-1/656827?inheritRedirect=false)>. Acesso em: 09 jun. 2016.

CARLO, Joyce Correna. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações Não-residenciais**. 2008. 196 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Ufsc, Florianópolis, 2008.

CHIVELET, Nuria Martín; SOLLA, Ignacio Fernández. **La envolvente fotovoltaica en la arquitectura**: Criterios de diseño y aplicaciones. Barcelona: Reverté, 2007. 183 p. (Estudios universitarios de Arquitectura).

DELL. **Servidor em torre PowerEdge T330**. Disponível em: <<http://www.dell.com/br/empresa/p/poweredge-t330/pd>>. Acesso em: 17 maio 2016.

Dias, J. B.; Silvério; W. V.; Krenzinger, A.. 2007. **Simulação dos índices da Performance Energética para uma Instalação Fotovoltaica Conectada à Rede em Diferentes Locais**. I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, Brasil. 2007.

EATON. **No-break Eaton 9135 - Monofásico**. Disponível em: <<http://www.officer.com.br/Util/pdf/103006722-6591.pdf>>. Acesso em: 17 maio 2016.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balço Energético Nacional 2015: Ano base 2014: Relatório Síntese** Rio de Janeiro: EPE, 2015

ESPÍNDOLA, Gabriel da Silveira et al. **Estudo e projeto de uma planta piloto com conceitos de arquitetura bioclimática**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS), 6., 2016, Mina Gerais. **Anais...** . Mina Gerais: CBENS, 2016. p. 1 - 8.

GASPARIN, Fabiano Perin; KRENZINGER, Arno. **DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM DEZ CIDADES BRASILEIRAS COM DIFERENTES ORIENTAÇÕES DO PAINEL**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS), 6., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** . Belo Horizonte: Cbens, 2016.

INMETRO. Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010. **Regulamento Técnico da Qualidade Para O Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas: RTQ-C**.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Florianópolis: [s.n.], 2012. 366 p.

LAMBERTS, Roberto; GHISI, Enedir; PESSOA, João Lorenço Novaes. **Estado da arte em eficiência energética: iluminação e envoltória**. Florianópolis, 2013.

LUMICENTER. **Luminárias Comerciais LED**. Disponível em: <<http://www.lumicenteriluminacao.com.br/>>. Acesso em: 15 maio 2016.

Macêdo, W. N. **Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR)**. Tese de Doutorado, PIPGE/USP, São Paulo, Brasil. 2006.

MENDES, N.; OLIVEIRA, Ricardo C L F de; SANTOS, G. H. . **DOMUS 1.0: A Brazilian PC Program for Building Simulation**. In: BUILDING SIMULATION 2001, 2001, Rio de Janeiro. Seventh International IBPSA Conference, 2001. v. 1. p. 83-89



PBEEDIFICA. Disponível em <<http://www.pbeedifica.com.br/sobre>>. Acesso em 06 de junho de 2016.

PHILIPS. **Sistemas de iluminação**. Disponível em: <<http://www.lighting.philips.com.br/>>. Acesso em: 15 maio 2016.

Pinho, João Tavares; Galdino, Marco Antonio (Brasil) (Org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014.

PROCEL, Eletrobrás /. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso: classe comercial - alta tensão**. Rio de Janeiro: Daag, 2008.

PUCPR (Paraná). **Histórico do desenvolvimento do projeto Domus: HISTÓRICO, PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DOMUS**. Curitiba, 2012.

RADIASOL2. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/#softwares>>. Acesso em: 13 jun. 2016.

RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Estudo de características elétricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2010. 254 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010

RÜTHER, Ricardo et al. Geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas: compromissos entre forma e função. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS), 4., 2012, São Paulo. **Anais...** . São Paulo: Cbens, 2012. p. 1 - 8.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil**. Florianópolis: Editora Ufsc, 2004. 114 p.

RÜTHER, Ricardo; SANTOS, Ísis Portolan dos. Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil. **Renewable Energy**. p. 116-124. mar. 2014.

SYSTEM Advisor Model (SAM). Disponível em: <<https://sam.nrel.gov/>>. Acesso em: 17 jun. 2016.

VASCONCELLOS, Luiz Eduardo Menandro (Rio de Janeiro). Eletrobras Procel (Org.). **Iluminação Eficiente: Iniciativas da Eletrobras Procel e Parceiros**. Rio de Janeiro, 2013. 266 p.