

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE UM PRÉDIO DE ENERGIA LÍQUIDA ZERO (PELZ) COM FOCO NOS
SISTEMAS

por

Rafael Gerzson Torres

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2011

PROJETO DE UM PRÉDIO DE ENERGIA LÍQUIDA ZERO (PELZ) COM FOCO NOS
SISTEMAS

por

Rafael Gerzson Torres

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Prof. Dr. Bardo Ernst Joseff Bodmann

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 05 de Dezembro de 2011.

Dedico este trabalho especialmente aos meus pais, Rubens e Claudia.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer meus pais Rubens e Claudia e ao meu irmão Guilherme, por proporcionarem um ambiente de amor, carinho e atenção especiais para atingir os objetivos que sonho desde “pequeno”.

Agradeço especialmente ao Professor e Orientador, Paulo Otto Beyer, pela atenção e disponibilidade ao esclarecimento de dúvidas, além das instruções para a realização deste trabalho, sempre de grande valia e qualidade.

À minha namorada Fernanda e a sua Família, pelo apoio, companheirismo e carinho ao longo de todo curso. Juntamente com minha família, tornaram mais fácil toda esta jornada.

Fazendo parte de minha formação profissional, um agradecimento especial aos amigos do DEAM: ao Daniel, à Daisy, ao Miguel, ao Rudi e à Maria Tereza. Jamais me esquecerei dos problemas que caíam “de paraquedas” em nossas mesas. Vocês foram demais.

Aos novos colegas de trabalho da Petinelli: Guido, Ricciano, Eduardo e a toda equipe, pelo incentivo e conselhos.

Gostaria de agradecer todos aqueles grandes amigos que caminharam ao meu lado ao longo de todos estes anos de Engenharia. Durante o tempo de graduação adquiri um conhecimento de alta qualidade e também, para minha sorte, inesquecíveis amigos que marcaram minha vida. Gostaria de citar, em especial: minha amiga Crissiane, pelos mais de 7 anos de amizade compartilhados na engenharia e nas risadas; ao malandro Matheus Daniel, talvez meu primeiro grande amigo na UFRGS, que se não fosse uma “Europa”, gostaria muito que estivesse se formando comigo; aos eternos amigos (e Engenheiros!) Tiago Longhi e Pedro Ponte, que, pelos mais diversos momentos, seja uma prova de Cálculo Numérico com febre ou uma “mesa redonda” nos bares da universidade jamais serão esquecidos, mesmo distantes seguindo a luta da vida em estados diferentes; ao amigo e também, antigo colega de trabalho, Eduardo, pela parceria nas piadas ‘sem graça’ ao longo dos últimos semestres; ao André, pela parceria nos estudos e trabalhos que dividimos, além dos mais diversos comentários e opiniões sobre a vida que compartilhamos (agradáveis ou nem tanto...); ao Robson, grande colorado, que ao longo da graduação sentiu na pele (e no carro) as dificuldades do curso; ao Bernardo, grande gremista, que escalava o time nos jogos de futebol da gurizada; ao Lorenzi, que está distante na Alemanha, mas mantém-se presente para o grupo de amigos; ao Daniel, que juntos comemoramos títulos (uma nova rivalidade SP x INT) e churrascos; ao Ricardo, por ter as mais diversas relações comparativas da vida com as situações que encontrávamos na engenharia; ao Tiago Andriotty, por compartilhar o carteadado de truço desde o início e os estudos até o fim.

Um agradecimento também a todos aqueles que já se formaram, tais como: a amiga Daniela; os amigos Diogo Bettoni, Cassiano Job, Otavio “Maionese”, Marcelo e Maurício. Também aos amigos que irão se formar em breve, como: Felipe “Bixo”, Luiz Piccoli, Adriel e “Thiagão”. Além de tantos outros colegas e amigos de Engenharia que fizeram parte desta caminhada.

À Daniela Pires, pelas ideias e parceria, além da paciência ao longo de todo o trabalho.

Um obrigado especial e homenagem a todos os professores do DEMEC-UFRGS que contribuíram durante todos esses anos, com um ensino de alta qualidade, além de proporcionarem um ambiente propício para a busca do conhecimento e formação de excelentes engenheiros.

“Quando somos bons para os outros,
somos ainda melhores para nós.”

Benjamin Franklin

TORRES, R. G. **Projeto de um Prédio de Energia Líquida Zero (PELZ) com foco nos Sistemas**. 2011. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar o projeto de um Prédio de Energia Líquida Zero (PELZ), ou seja, um prédio onde o balanço de energia é menor que ou igual a zero, em escala anual. Este projeto ilustra a possibilidade da construção de edificações eficientes, através de corretas alternativas. A ocupação terá como padrão um prédio de escritórios, dentro de um ambiente acadêmico. Para tanto, se utilizou dados climáticos e o *software* de simulação *EnergyPlus*. As estratégias para os sistemas da edificação utilizadas neste projeto: utilização de painéis fotovoltaicos, sensores fotoelétricos e dimerização para controle da iluminação artificial, prateleiras de luz para difundir e homogeneizar a iluminação natural, seleção de equipamentos eficientes, coleta de água das chuvas e uma torre evaporativa para realizar o arrefecimento dos ambientes. Com estas aplicações, realizaram-se simulações para alcançar os resultados visados. O balanço energético líquido, em escala anual, foi de -1516 kW.h, significando que, no sítio, foi consumido menos energia do que produzido pelos módulos fotovoltaicos. Além disto, teve-se a preocupação de manter conforto térmico e conforto lumínico para os ocupantes. A menor temperatura no interior da edificação, durante a ocupação, foi de aproximadamente 18 °C, enquanto a maior temperatura foi em torno de 29 °C. As horas de desconforto estão dentro de limites determinados por norma, não ultrapassando 207 horas ao longo do ano. O controle de iluminação adotado conferiu grandes reduções de consumo energético, pois as luzes artificiais (lâmpadas LED) foram ligadas, em média, 316 horas em cada zona do prédio. Todas as estratégias de projeto, relacionadas aos sistemas, juntamente com estratégias construtivas e passivas conferem à edificação o “título” de Prédio de Energia Líquida Zero, onde a demanda de energia é menor do que a energia transformada no sítio.

PALAVRAS-CHAVE: Prédio de Energia Líquida Zero, PELZ, EnergyPlus, Painéis Fotovoltaicos, Controle de Iluminação, Conforto Térmico, Eficiência Energética de Edificações.

TORRES, R. G. **Design of a Net Zero Energy Building (NZEB) with a focus on Systems.** 2011. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

This paper aims to present the design of a Net Zero Energy Building (NZEB), in other words, a building where the energy balance is equal to or less than zero, in annual scale. This project illustrate the possibility of constructing efficient buildings, using correct alternatives. The occupation will be default to an office building, within an academic environment. Therefore, was used weather data and the simulation software EnergyPlus. The design strategies for building systems are: photovoltaic panels, photoelectric sensors and dimming controls for lighting, light shelves to spread and mix natural lighting, selection of efficient equipment, rainwater collection and a tower to perform evaporative cooling for the interior zones. With these applications, simulations were performed to achieve the desired results. The net energy balance in annual scale was -1516 kW.h, meaning that the site was less energy consumed than is produced by the photovoltaic modules. In addition, there was the concern to maintain thermal comfort and lighting comfort for the occupants. The lower temperature inside the building, during the occupation, was about 18 °C, while the highest temperature was around 29 °C. The hours of discomfort are within certain standard limits, not exceeding 207 hours throughout the year. Lighting control adopted gave large reductions in energy consumption because the artificial lights (LED) have been turned on 316 hours, on average, in each area of the building. All design strategies related to systems, along with constructive and passive strategies gave the building the “title” Net Zero Energy Building, where energy demand is lower than the energy transformed into the site.

KEYWORDS: Net Zero Energy Building, NZEB, EnergyPlus, Photovoltaic Panels, Lighting Control, Thermal Comfort, Energy Efficiency of Buildings.

SUMÁRIO

RESUMO	VI
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. OBJETIVOS	2
4. METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	2
4.1. Localização	2
4.2. <i>Software</i> de Simulação	3
4.3. Balanço Energético das Zonas na Simulação	3
4.4. Arquivo Climático	3
5. DADOS DE ENTRADA NO <i>ENERGYPLUS</i>	4
5.1. Modelagem Geométrica do Prédio de Energia Líquida Zero	4
5.2. Cargas Internas	4
5.3. Controle de Iluminação	5
5.4. Modelo para Painéis Fotovoltaicos	5
5.5. Captação de Águas das Chuvas	7
5.6. Modelo para Torre Evaporativa	8
5.7. Condições Internas de Conforto	9
6. RESULTADOS PARA O PROJETO PROPOSTO	9
6.1. Iluminação Eficiente	9
6.2. Resfriamento Evaporativo	10
6.3. Transformação de Energia no Sítio	11
6.4. Conforto Térmico	12
6.5. Consumo e Balanço de Energia em Escala Anual	13
6.6. Custo Energético	13
7. CONCLUSÕES	14
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
ANEXOS	16
APÊNDICES	18

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1.: Modelo para o Prédio de Energia Líquida Zero	2
Figura 4.2.: Temperatura de bulbo seco externa para Porto Alegre ao longo do ano	4
Figura 5.1.: Modelo geométrico para simulação do Prédio de Energia Líquida Zero	4
Figura 5.2.: Controle de iluminação adotado	5
Figura 5.3.: Balanço de energia no módulo fotovoltaico	6
Figura 5.4.: Balanço de energia para o ar no interior da cavidade	6
Figura 5.5.: (a) Curva corrente-tensão para variações de temperatura ; (b) Curva corrente-tensão para variações de radiação incidente (Fonte: Kyocera, 2011)	7
Figura 5.6.: Modelo adotado para torre evaporativa	8
Figura 5.7.: Zonas de conforto térmico	9
Figura 6.1.: Campos de iluminância para as zonas do Prédio de Energia Líquida Zero	10
Figura 6.2.: Temperaturas operativas durante a semana climática mais quente	11
Figura 6.3.: Energia transformada no local	11
Figura 6.4.: Desempenho do arranjo fotovoltaico nos dias de solstício	12
Figura 6.5.: Temperatura operativa anual para as zonas do Prédio de Energia Líquida Zero	12
Figura 6.6.: (a) Consumo energético ; (b) Balanço energético	13

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o consumo energético cresce a cada dia ao redor do mundo, tornando-se um objeto de estudo de muitos especialistas, que visam diminuir estes gastos, além da aplicação de novas formas de obtenção de energia. A evolução de tecnologias possibilitou a diversificação da rede energética dos países, abrindo espaço para fontes renováveis e reaproveitamento de recursos naturais.

Um Prédio de Energia Líquida Zero (PELZ) é uma construção que tem um balanço global de energia líquida menor que ou igual à zero, em escala anual. Estas construções têm ideais voltados para a sustentabilidade e possuem diversos predicados, tais como o baixo, ou zero, impacto ao meio ambiente. Para atingir este objetivo, existem diversas opções, desde a concepção do projeto arquitetônico, a escolha de alternativas passivas na envoltória da edificação e de equipamentos e sistemas eficientes.

O projeto de um PELZ exige empenho, conhecimentos especializados e colaboração de todos os membros de uma equipe, incluindo engenheiros, arquitetos e empreiteiros. Além disso, é necessário que os futuros ocupantes da edificação tenham consciência das suas ações no ambiente em que se encontram, para que haja colaboração e racionalização no consumo de energia e recursos.

Hoje em dia ocorre grande disseminação deste tipo de projetos, até mesmo o de grandes bairros e condomínios eficientes. A tecnologia e a base técnico-científica para este tipo de projeto é conhecida e, com a crescente preocupação com a preservação dos recursos naturais e do meio ambiente, impulsionam aqueles que buscam desenvolver construções sustentáveis e a sempre buscar soluções inovadoras para atender ao máximo a eficiência energética.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise de eficiência energética das edificações evolui com o passar dos anos, principalmente com a crescente preocupação na manutenção dos recursos naturais. A demanda de energia cada vez maior, de acordo com o crescimento populacional e expansão dos centros urbanos, e as crises no suprimento de energia em alguns países, na última década, serviram de impulso para a diversificação das matrizes energéticas e elaboração de estudos para evitar desperdícios no consumo de energia elétrica.

O Ministério de Minas e Energia publicou, em dezembro de 2002, o Plano de Trabalho da Implementação da Lei de Eficiência Energética, Lei n.º 10.295 de 17 de outubro de 2001 [MME, 2011]. Referente Plano de Trabalho trata dos mecanismos que deverão ser desenvolvidos para que ocorram e promovam a eficiência energética nas edificações construídas no país, destacando que a eficiência energética de uma edificação não ocorre apenas com a utilização de equipamentos e iluminação energeticamente eficientes, considera-se também o projeto arquitetônico elaborado de forma eficiente, com arquitetura adaptada ao clima da região, levando em consideração estratégias de iluminação e ventilação natural, integradas às artificiais, utilização de proteções solares corretas e criteriosa seleção de materiais construtivos para o envelope da edificação.

O Plano ressalta a concepção de projetos integrados de edificação, visando a sustentabilidade para novas construções. De forma análoga, podem ser utilizadas técnicas para a reestruturação e modernização de edificações (*retrofit*) almejando a eficiência energética. Dentro deste contexto, existe a aplicação do Projeto Brasileiro de Etiquetagem para edificações e outros modelos de certificação para prédios eficientes.

O PROCEL-EDIFICA [Eletrobras, 2003] promove o uso racional da energia elétrica em edificações desde a sua fundação, incentivando a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais, tais como a água, luz e a ventilação nas edificações, reduzindo desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente. Ainda, segundo o PROCEL-EDIFICA, o consumo de energia elétrica nas edificações corresponde a cerca de 45% do consumo no país. Baseado nisto, estima-se um potencial de redução deste consumo em 50% para novas edificações e de 30%

para aquelas que promoverem reformas que contemplem os conceitos de eficiência energética em edificações.

Internacionalmente, o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) é um protocolo de avaliação e certificação de edificações conhecido e aceito [USGBC, 2011]. Foi inicialmente desenvolvido por um comitê ligado ao USGBC (*United States Green Building Council*), visando a encorajar e acelerar a adoção de práticas sustentáveis de edificações ecologicamente corretas, criando e implementando padrões, ferramentas e procedimentos. Na área comercial, a certificação LEED contempla vários segmentos: novas construções, construções já existentes, interiores comerciais, escolas e bairros. Em todos os casos existe um sistema de classificação graduado, resultado de uma contagem geral de pontos atribuídos a cada segmento de construção.

Liberali, 2010, realizou a comparação de diferentes concepções de envoltória para um prédio existente e verificou as consequências de cada tipo no consumo anual de energia para um prédio existente, tendo como ferramenta o *EnergyPlus*. Concluiu que a seleção de materiais construtivos para paredes e, principalmente, especificações adequadas para vidros, além de um projeto de iluminação, são aspectos importantes para o consumo energético final de uma edificação.

Hagel, 2005, estudou a demanda energética de climatização de um prédio através do *software EnergyPlus*. Verificou as mudanças de consumo energético com a variação da orientação, localização do prédio e materiais empregados. Através dos resultados obtidos constatou a importância da simulação computacional para atingir a eficiência energética.

3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo apresentar o projeto de um Prédio de Energia Líquida Zero (PELZ) focado os sistemas inerentes à construção. Para isto, adotam-se equipamentos energeticamente eficientes, sistemas para transformação de energia, através de painéis fotovoltaicos, controles para iluminação, reaproveitamento das águas da chuva e utilização de uma torre evaporativa. Todas estas alternativas visam, em escala anual, zerar o consumo de energia ou atingir um balanço de energia negativo no sítio. Para atingir estes objetivos, utilizou-se, para a visualização e modelagem geométrica, o *software Google Sketchup* [GOOGLE, 2011], juntamente com o *plugin OpenStudio* [DOE, 2011], que geram arquivos do tipo ".idf" (*Input Data File*) que são utilizados pelo *software* de simulação energética de edificações e sistemas *EnergyPlus* [DOE, 2011].

4. METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

4.1. Localização

Projeta-se o Prédio de Energia Líquida Zero (PELZ) para ser construído no Campus do Vale, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em uma área onde futuramente estará o prédio do Departamento de Engenharia Mecânica. A edificação possui uma área total de 274,78 m² (plantas no anexo A). A Figura 4.1 ilustra um modelo para o prédio.



Figura 4.1 – Modelo para o Prédio de Energia Líquida Zero

4.2. Software de Simulação

O *EnergyPlus* é um programa de simulação térmica e energética que possibilita o cálculo de cargas térmicas de refrigeração e aquecimento, o cálculo de consumo e transformação energética e o cálculo de fatores e propriedades térmicas para uma edificação, simulando, energeticamente, o prédio em operação e ocupação em uma escala anual. Tal programa foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) a partir de outros dois programas, o *BLAST* e o *DOE-2*, e utiliza o FORTRAN 90 como linguagem computacional. O *EnergyPlus* realiza uma simulação integrada de suas partes, significando que a simulação da edificação, dos seus sistemas e de equipamentos da planta central é resolvida simultaneamente. Outros programas como o *BLAST* ou *DOE-2* resolvem de forma sequencial estas três partes, impossibilitando um *feedback* de cada item para o outro. Sua programação baseia-se no balanço de energia para as cargas térmicas. A transferência de calor ocorre através dos elementos constituintes da construção de forma transiente, utilizando funções de transferência para realizar os cálculos de condução, convecção e radiação.

4.3. Balanço Energético das Zonas na Simulação

Uma zona térmica é um volume de ar a uma temperatura uniforme e cada zona tem um sistema independente de controle térmico [*ENERGYPLUS Engineering Reference*, 2011]. As características internas da zona tem influência sobre o balanço de energia, definido pelas equações de balanço sensível (eq. 4.1) e latente (eq. 4.2) para as zonas.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{m}_{sis} C_p (T_{ar,e} - T_z) \quad (4.1)$$

onde $C_z \frac{dT_z}{dt}$ é a taxa de armazenamento de energia no volume de ar da zona térmica; $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ é a soma das cargas internas convectivas (pessoas e equipamentos); $\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ é a transferência de calor convectiva das superfícies da zona térmica; $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ é o somatório das transferências de calor por infiltração de ar de outras zonas térmicas; $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ é a transferência de calor por infiltração de ar externo; $\dot{m}_{sis} C_p (T_{ar,e} - T_z)$ é o termo de transferência de calor com o sistema de ar condicionado, sendo os termos da equação descritos em watt.

$$\rho_{ar} V_z C_w \frac{dW_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} kg_{massa} + \sum_{i=1}^{N_{superf}} A_i h_{mi} \rho_{ar,z} (W_{superf,i} - W_z^t) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t) + \dot{m}_{inf} (W_{\infty} - W_z^t) + \dot{m}_{sis} (W_{ar} - W_z^t) \quad (4.2)$$

onde $\rho_{ar} V_z C_w \frac{dW_z}{dt}$ é a parcela transiente para trocas de razão de umidade na zona; $\sum_{i=1}^{N_{sl}} kg_{massa}$ é a soma das cargas latentes internas; $\sum_{i=1}^{N_{superf}} A_i h_{mi} \rho_{ar,z} (W_{superf,i} - W_z^t)$ é a convecção de ar pelas superfícies; $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t)$ é a parcela para a ventilação entre zonas; $\dot{m}_{inf} (W_{\infty} - W_z^t)$ é a infiltração na zona; $\dot{m}_{sis} (W_{ar} - W_z^t)$ é a vazão do sistema de ar condicionado, sendo os termos descritos em kg/s.

4.4. Arquivo Climático

Para realizar a simulação no período de um ano, o *EnergyPlus* utiliza um arquivo de dados climáticos locais. O arquivo climático possui indicadores de localização da cidade, como latitude, longitude, altitude, temperatura do solo, direção e velocidade dos ventos, temperaturas de bulbo seco e de orvalho, umidade relativa e radiação solar (global, direta, difusa, infravermelha). Este arquivo possui a extensão “.epw” (*EnergyPlus Weather*). Este arquivo informa os dados em intervalos de tempo (minuto a minuto, hora a hora). A montagem deste

arquivo estatístico de dados segue o método *TRY (Test Reference Year)*, que consiste na determinação de um ano representativo, a partir de uma série histórica de dados climáticos de 10 anos ou mais.

Obteve-se o arquivo climático referente à cidade de Porto Alegre, utilizado neste trabalho e ilustrado pela Figura 4.2, no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LABEEE [LABEEE, 2011].

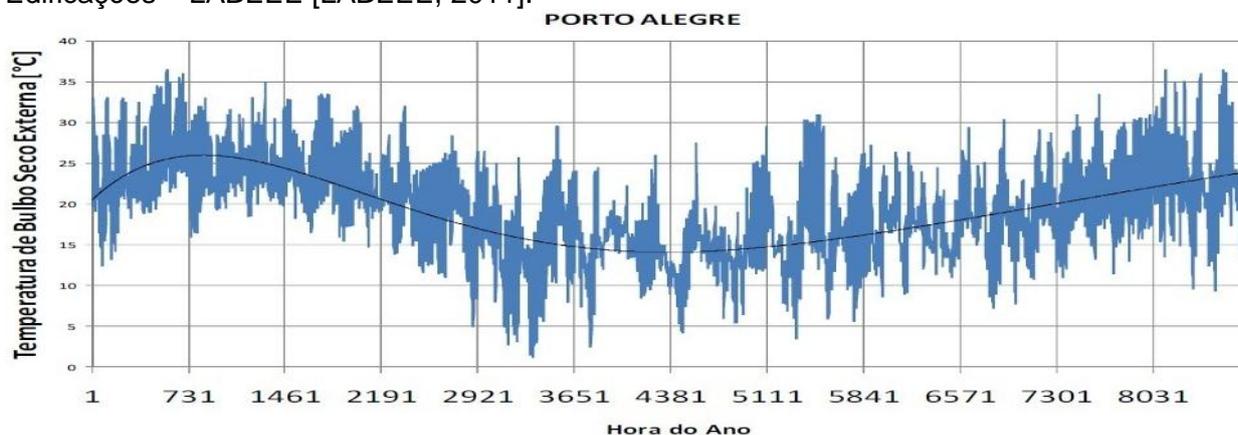


Figura 4.2 – Temperatura de bulbo seco externa para Porto Alegre ao longo do ano climático

5. DADOS DE ENTRADA NO *ENERGYPLUS*

Considerando o objetivo de tornar o balanço de consumo de energia, em escala anual, igual a zero ou negativo, uma vez que o sítio transforma energia solar em elétrica através de painéis fotovoltaicos, procedem-se as estratégias de projeto adotadas para conferir esta eficiência para a edificação. Em paralelo, também se busca manter condições de conforto para os ocupantes do prédio e boas condições para o trabalho de escritório desenvolvido em seu interior.

5.1. Modelagem Geométrica do Prédio de Energia Líquida Zero

Para criar o modelo geométrico em 3D do prédio utilizou-se o *software Google Sketchup*. O prédio foi dividido nas seguintes zonas térmicas: térreo-norte, térreo-sul, mezanino e serviços. Tal denominação está de acordo com a orientação adotada para a edificação, com a entrada voltada para o norte. A Figura 5.1 apresenta o modelo geométrico utilizado como dado de entrada para o *software* de simulação.



Figura 5.1 – Modelo geométrico para simulação do Prédio de Energia Líquida Zero

5.2. Cargas Internas

Como se caracteriza uma atividade de escritório, dimensionou-se uma ocupação para 19 funcionários, utilizando *ASHRAE Fundamentals Handbook* [ASHRAE, 2009], que define uma densidade média para edifícios comerciais de 11,6 m²/pessoa. O cronograma de trabalho

ocorre das 08 h às 12 h, com intervalo até às 14 h, onde a ocupação estimada neste período é de 50%, e término de expediente às 18 h.

Utilizam-se lâmpadas de LED em todas as luminárias da edificação, pois elas possuem elevada economia de energia e maior tempo de vida útil em comparação com as lâmpadas fluorescentes e incandescentes tradicionais. Esta economia pode chegar a valores entre 50-80% em relação às tradicionais [PHILIPS, 2010].

Adotou-se a utilização de um *notebook* para cada ocupante, pois estes consomem 1/3 da energia de um *desktop* convencional [ELETROBRAS, 2011], totalizando 20 W/computador de potência instalada. Outros equipamentos instalados são: uma impressora multifuncional (275 W), uma cafeteira (550 W), um micro-ondas (900 W). Além de um frigobar (100 W) posicionado com o trocador de calor para fora do prédio, evitando a dissipação de calor para dentro dos ambientes.

5.3. Controle de Iluminação

Primeiramente determinam-se os pontos de controle de iluminância dentro de um ambiente, através de sensores fotoelétricos e dimmer. Este par de componentes forma o controlador. O dimmer é um variador de tensão que regula a luminosidade das lâmpadas de zero até o máximo, e o sensor fotoelétrico detecta a luminosidade ambiente. Dentro de cada zona da edificação dois controladores estão instalados de forma com que diferenciem zonas próximas de janelas e zonas mais internas, cada um controlando 50% da área da zona. O controle adotado de iluminância baseia-se na norma ABNT-NBR 5413 que prevê para um escritório, 500 lux de iluminância.

O procedimento na simulação compara o valor de iluminância devido à claridade natural e faz a comparação com o *setpoint* adotado de 500 lux. Se o valor de iluminação natural for superior a este *setpoint*, as lâmpadas continuam desligadas, entretanto, se o valor for abaixo do *setpoint*, o controle começa a regular a intensidade de iluminação das lâmpadas no interior, segundo a Figura 5.2 a seguir.

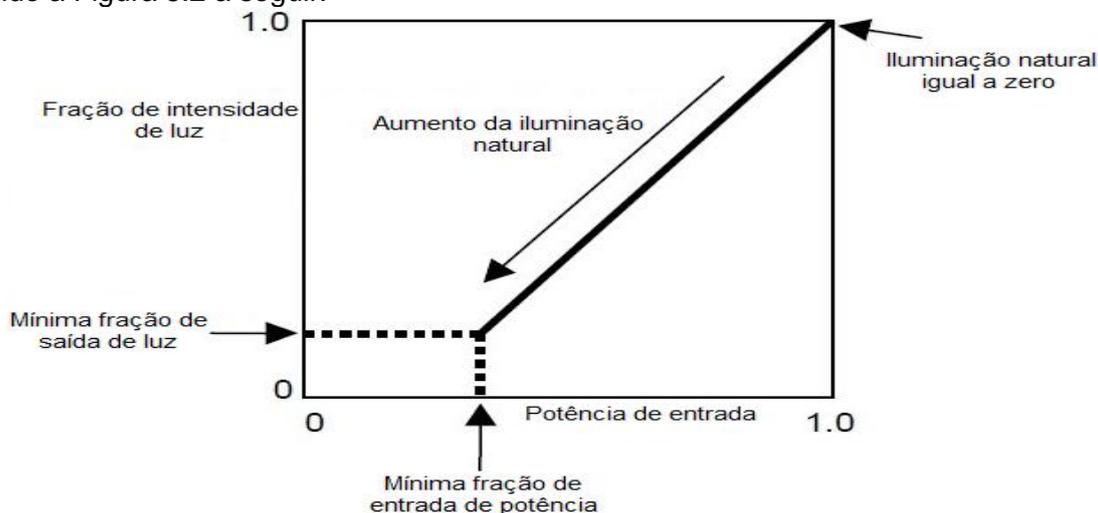


Figura 5.2 – Controle de iluminação adotado

5.4. Modelo para Painéis Fotovoltaicos

Para esta instalação foi necessário um modelo para cavidades ventiladas porque existe uma condição de contorno externa a das superfícies de transferência de calor (cobertura). Os painéis funcionam como defletores de radiação e convecção situados entre o ambiente exterior e a face externa da superfície da cobertura. O balanço energético para os painéis fotovoltaicos é ilustrado pela Figura 5.3 a seguir.



Figura 5.3 – Balanço de energia no módulo fotovoltaico

A equação para o volume de controle é:

$$q''_{a\,sol} + q''_{R,amb} - q''_{conv,amb} + q''_{R,cav} - q''_{conv,cav} + q''_{fonte} = 0 \quad (5.1)$$

onde $q''_{a\,sol}$ é o fluxo de radiação solar direta e difusa absorvida; $q''_{R,amb}$ é o fluxo de radiação proveniente do ambiente; $q''_{conv,amb}$ é fluxo convectivo com relação ao ar exterior; $q''_{R,cav}$ é o fluxo de radiação proveniente do interior da cavidade; $q''_{conv,cav}$ é o fluxo convectivo com relação ao ar da cavidade; q''_{fonte} é o termo fonte que se adota quando a superfície é um módulo fotovoltaico, sendo os termos da equação descritos em W/m^2 .

A cavidade é modelada como uma mistura uniforme de ar, e o balanço de energia para o ar no interior é ilustrado pela Figura 5.4 a seguir.



Figura 5.4 – Balanço de energia para o ar no interior da cavidade

A equação para este volume de controle é:

$$\dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{conv,mód} + \dot{Q}_{conv,superf} = 0 \quad (5.2)$$

onde \dot{Q}_{vent} é a taxa de energia adicionada pela ventilação natural onde o ar exterior se mistura com o ar da cavidade; $\dot{Q}_{conv,mód}$ é a taxa de energia adicionada pela transferência de calor por convecção da superfície subjacente; $\dot{Q}_{conv,superf}$ é a taxa de energia adicionada pela transferência de calor por convecção do módulo fotovoltaico.

Para os cálculos diretamente relacionados aos módulos fotovoltaicos, utilizou-se uma rotina de cálculo, dentro do *EnergyPlus*, baseada no trabalho feito no *Sandia National Lab.*, dos Estados Unidos, por King et al. (2003), que consiste de uma série de relações empíricas com coeficientes que são derivados de testes experimentais com uma diversidade de módulos fotovoltaicos comerciais. Estes parâmetros são aplicados em equações para selecionar cinco pontos de operação na curva corrente-tensão dos painéis.

Esta aplicação busca determinar o desempenho no ponto de máxima potência da curva corrente-tensão, assumindo que o desempenho de um conjunto de módulos idênticos é linear com o número de módulos em série e paralelo. Assume-se um inversor ideal, sem perdas, para esta instalação, e como o desempenho das células fotovoltaicas está relacionado com a

temperatura de operação, esta é obtida através do balanço de energia da cavidade, e para cada nova iteração no procedimento, adota-se a temperatura do passo de tempo anterior. A temperatura na superfície inferior do módulo e da célula fotovoltaica são definidas por:

$$T_m = E \cdot (e^{a+b \cdot V}) + T_a \quad (5.3)$$

$$T_c = T_m + \frac{E}{E_0} \cdot \Delta T \quad (5.4)$$

onde T_m é a temperatura do módulo [°C]; E é a irradiação solar incidente sobre a superfície do módulo [W/m^2]; a e b são coeficientes empíricos que relacionam temperatura, velocidade dos ventos e radiação; V é a velocidade dos ventos [m/s]; T_a é a temperatura de bulbo seco do ambiente [°C]; T_c é a temperatura da célula fotovoltaica [°C]; E_0 é a referência para irradiação solar [$1000 W/m^2$]; ΔT é a diferença de temperatura entre T_c e T_m [°C].

Através dos pontos de operação na curva corrente-tensão do módulo fotovoltaico selecionado (Figura 5.5) a potência de operação pode ser obtida.

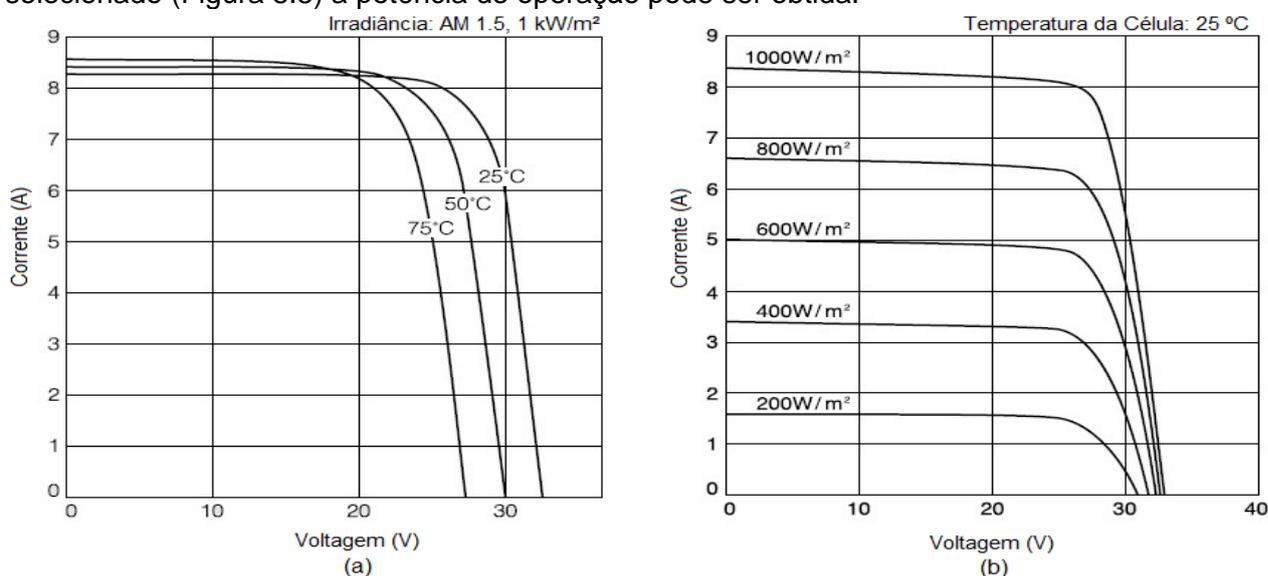


Figura 5.5(a) – Curva corrente-tensão para variações de temperatura; Figura 5.5(b) – Curva corrente-tensão para variações de radiação incidente [KYOCERA KD205GX – LPU, 2011]

$$P_{\text{ponto máx}} = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad (5.5)$$

onde $P_{\text{ponto máx}}$ é a potência gerada no ponto de máxima corrente e tensão [W]; I_{mp} é a corrente máxima em operação [A]; V_{mp} é a tensão máxima em operação [V]. Estes pontos de máxima corrente e tensão estão localizados no ponto de inflexão da curva.

O rendimento máximo de painéis fotovoltaicos é alcançado através da incidência perpendicular da irradiação solar ao plano fotovoltaico. Para Porto Alegre, a irradiação diária média anual sobre uma superfície horizontal é 4457 W.h/m² (ZANESCO et al., 2004). Os painéis estão integrados a superfície da cobertura, que possui uma inclinação de 35°. Simulou-se a geração fotovoltaica desde a inclinação de 30° (inclinação de acordo com a latitude de Porto Alegre, 30° S) e verificou-se um aumento de produção de energia elétrica conforme a angulação aumentava. Por se tratar de um projeto integrado de envoltória, sistemas e também da volumetria arquitetônica, decidiu-se por manter a inclinação em 35° N.

5.5. Captação de Água das Chuvas

As coberturas do prédio servem como aparo para a água das chuvas e selecionou-se um reservatório de 5000 L para esta função, que fica exatamente acima da zona de serviços

(banheiros), com um desnível favorável ao escoamento da água colhida para o interior do reservatório, evitando gastos com bombeamento de água.

5.6. Modelo para Torre Evaporativa

É um sistema utilizado com o objetivo de capturar o vento no topo de uma torre e resfriar este ar exterior utilizando a evaporação da água borrifada por orifícios, e entregar este fluxo de ar para determinados ambientes. A torre consiste de um borrifador de água, um volume interno para o escoamento de ar úmido, uma bomba e um reservatório de armazenamento de água. Portanto neste sistema o único componente consumidor de energia é a bomba. Tal esquema é ilustrado pela Figura 5.6.

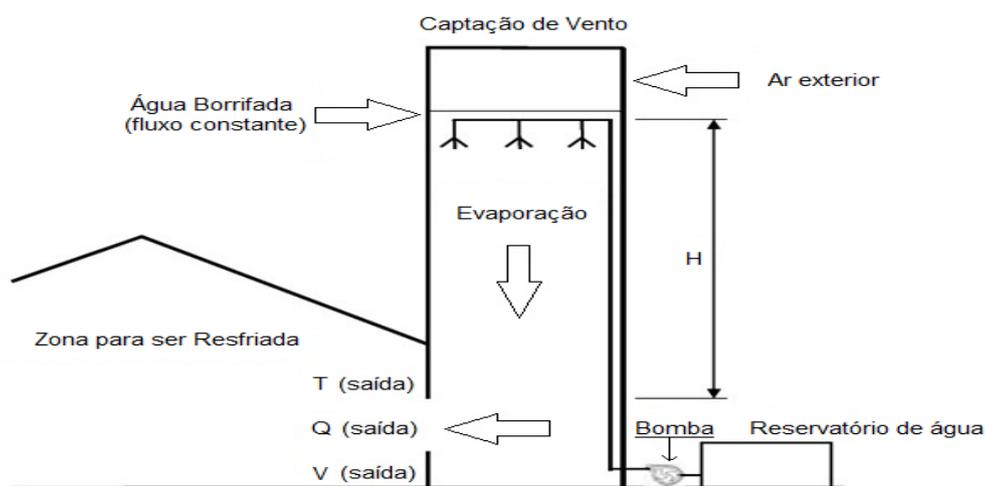


Figura 5.6 – Modelo adotado para torre evaporativa

A água é bombeada e borrifada no topo da torre, caindo junto com o fluxo de ar exterior captado pela torre. Este fluxo é resfriado e conforme é umidificado, aumenta sua densidade, naturalmente cai, aumentando sua velocidade para, no final do percurso, sair por aberturas para as zonas. As trocas térmicas e a velocidade terminal do ar úmido estão diretamente relacionadas com a altura da torre.

As considerações iniciais para os cálculos de entrada de ar na torre são baseadas no arquivo climático da cidade tais como: umidade relativa, entalpia do ar exterior e pressão barométrica, e assume-se que estas propriedades não variam entre a entrada na torre e o começo de mistura com água borrifada. O equacionamento para este modelo é descrito a seguir [ENERGYPLUS Engineering Reference, 2011]:

$$T_{saída} = T_{bs} - (T_{bs} - T_{bu}) \cdot [1 - \exp(-0,8 \cdot H)] [1 - \exp(-0,15 \cdot \dot{V}_{água})] \quad (5.6)$$

onde $T_{saída}$ é a temperatura de saída do ar insuflado no ambiente [°C]; T_{bs} é a temperatura de bulbo seco exterior [°C]; T_{bu} é a temperatura de bulbo úmido exterior [°C]; H é a altura efetiva da torre [m]; $\dot{V}_{água}$ é a vazão de água dispensada pela torre [L/min].

A vazão de ar na saída Q [L/min] pode ser determinado diretamente em função da altura efetiva da torre e da vazão de água, através da seguinte equação:

$$Q = 0,0125 \cdot \dot{V}_{água} \cdot H^{0,5} \quad (5.7)$$

A velocidade de saída do fluxo de ar conduzido pela torre $V_{saída}$ [m/s] é determinada em função da altura efetiva da torre e da velocidade do ar exterior V_{ar} [m/s].

$$V_{saída} = 0,7 \cdot H^{0,5} + 0,47(V_{ar} - 1) \quad (5.8)$$

Dimensionou-se a potência da bomba [P] considerando: altura total mais a perda de carga igual a 9 m; vazão de projeto para a torre [V̇] de 0,001667 m³/s (comum para torres evaporativas); eficiência da bomba [η] de 0,75 (comercialmente comum).

$$P = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{\eta} \quad (5.9)$$

Com estas considerações, calculou-se uma bomba de 200 W (1/4 CV) para recalcar a água. A torre evaporativa atua tanto durante a ocupação do prédio como durante a noite, realizando a ventilação noturna e proporcionando o controle de temperatura dos ambientes internos para ocupação no próximo dia. Ela utiliza as águas da chuva contidas no reservatório, entretanto quando não é suficiente, é necessária a captação de água da rede municipal.

5.7. Condições Internas de Conforto

Conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Se o balanço de todas as trocas de energia as quais está submetido um corpo for nulo ou próximo e a temperatura da pele e a evaporação-transpiração estiverem dentro de certa faixa de controle, pode-se dizer que este homem está em conforto térmico [ASHRAE, 2009]. Pode-se dizer que conforto térmico é uma sensação da mente na qual é expressa satisfação com o ambiente térmico [BEYER, 2010].

Admitiu-se a temperatura operativa T_{OP} como parâmetro para avaliar as condições internas nos ambientes. A temperatura operativa pode ser definida como a média das temperaturas médias radiantes das superfícies e do ar ambiente, ponderadas pelos respectivos coeficientes de transferência de calor convectivo e radiante.

Baseado na ASHRAE 55-2004, norma para conforto térmico em ambientes, estabeleceu-se o intervalo de 19,5°C até 28°C como faixa aceitável para conforto térmico, ilustrado pela Figura 5.7 e adotado o critério de no máximo 300 horas de desconforto durante a ocupação ao longo do ano.



Figura 5.7 – Zonas de conforto térmico

6. RESULTADOS PARA O PROJETO PROPOSTO

6.1. Iluminação Eficiente

A utilização de lâmpadas LED proporcionou economia no consumo energético em comparação com lâmpadas fluorescentes, entretanto obteve-se uma redução significativa de consumo com a utilização de controles na iluminação das zonas. Projeta-se 50 horas de trabalho por semana, resultando num total de 2600 horas de trabalho ao longo do ano. No ano

todo, consideram ligadas as luzes durante a ocupação: 317 horas no térreo-sul, 318 horas no mezanino e 315 horas no térreo-norte. Estes valores significam que apenas 12% das horas durante a ocupação as luzes estarão ligadas. Tais resultados foram obtidos com os controles e com a aplicação de prateleiras de luz nas janelas, refletindo e espalhando iluminação ao longo dos ambientes. A norma ASHRAE 90.1 especifica dias de projeto, e a seguir são ilustrados os gráficos (Figura 6.1) para o dia 21 de março (equinócio) às 15 horas (dia de projeto), que confirmam os níveis de iluminância acima de 500 lux, previstos em norma, mantendo conforto lumínico.

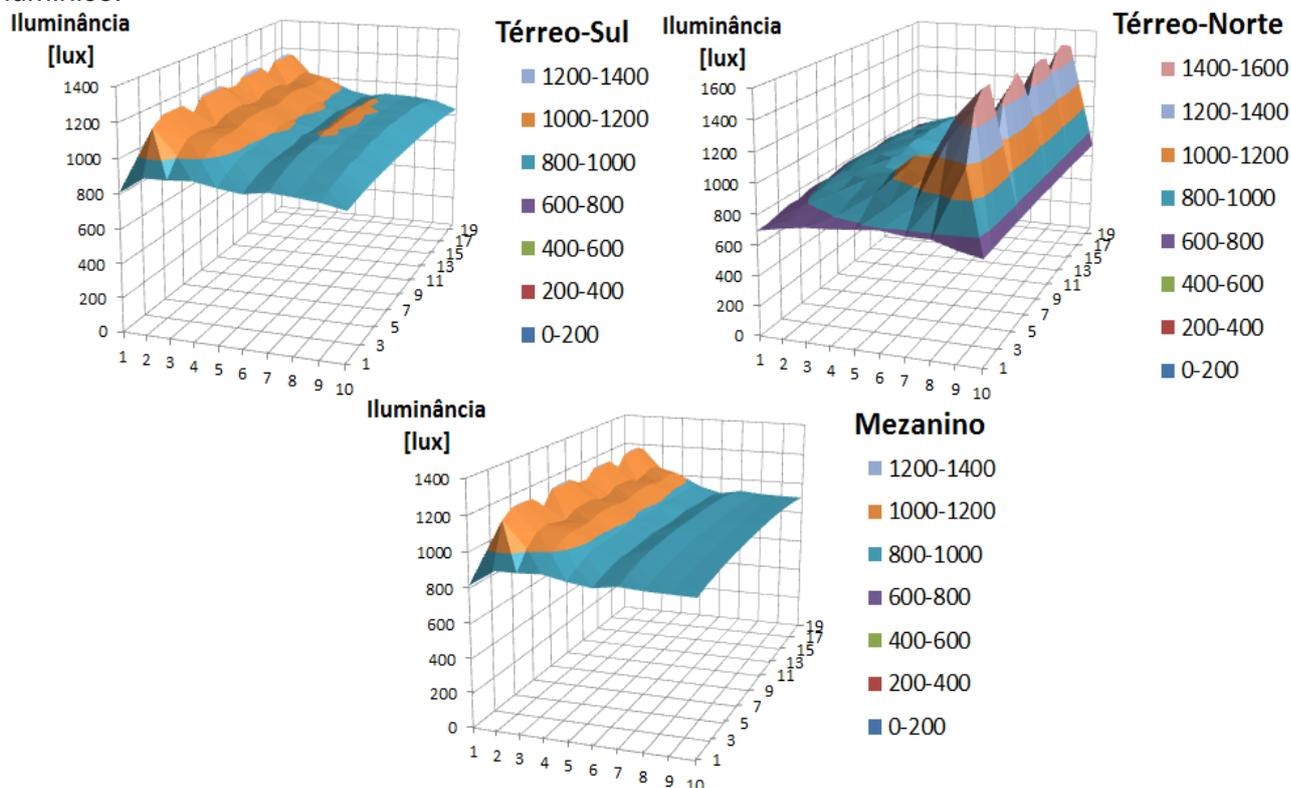


Figura 6.1 – Campos de iluminância para as zonas do Prédio de Energia Líquida Zero

6.2. Resfriamento Evaporativo

O controle das temperaturas internas e a condição de conforto para os ocupantes foram metas do projeto. Por causa da alta inércia térmica do prédio e outras estratégias de projeto, o mesmo esquenta muito durante o dia e não consegue dissipar este calor durante a noite, fazendo com que já pela manhã do dia seguinte ele encontrava-se quente.

A adoção de uma torre evaporativa, para realizar o arrefecimento tornou-se de grande valia, uma vez que o consumo elétrico ocorreria somente pela utilização de uma bomba, ao invés de se utilizar todo um sistema de ar condicionado, dispendioso em consumo de energia. No caso, a torre evaporativa tem saída de ar para duas zonas: mezanino (1,8 m² de abertura) e térreo-norte (0,6 m² de abertura). Por motivos arquitetônicos, o térreo-sul não pôde ser beneficiado por este arrefecimento, entretanto, a ventilação natural e a diminuição de temperaturas nas outras duas zonas implicaram em reduções de temperatura operativa para esta zona.

Realizando um balanço do consumo em escala anual, foram consumidos na torre 231 m³ de água e coletou-se no sítio 185 m³ de água proveniente das chuvas. Considerando um volume inicial de 2,5 m³ de água no reservatório e o contínuo arrefecimento da torre nos dias quentes, verificou-se que a coleta de águas da chuva auxilia na recuperação de volume para o reservatório.

A aplicação do resfriamento evaporativo é representada pelas temperaturas na semana climática mais quente de janeiro, ilustrado pela Figura 6.2 a seguir, verificando a eficácia na sua aplicação em arrefecer os ambientes.

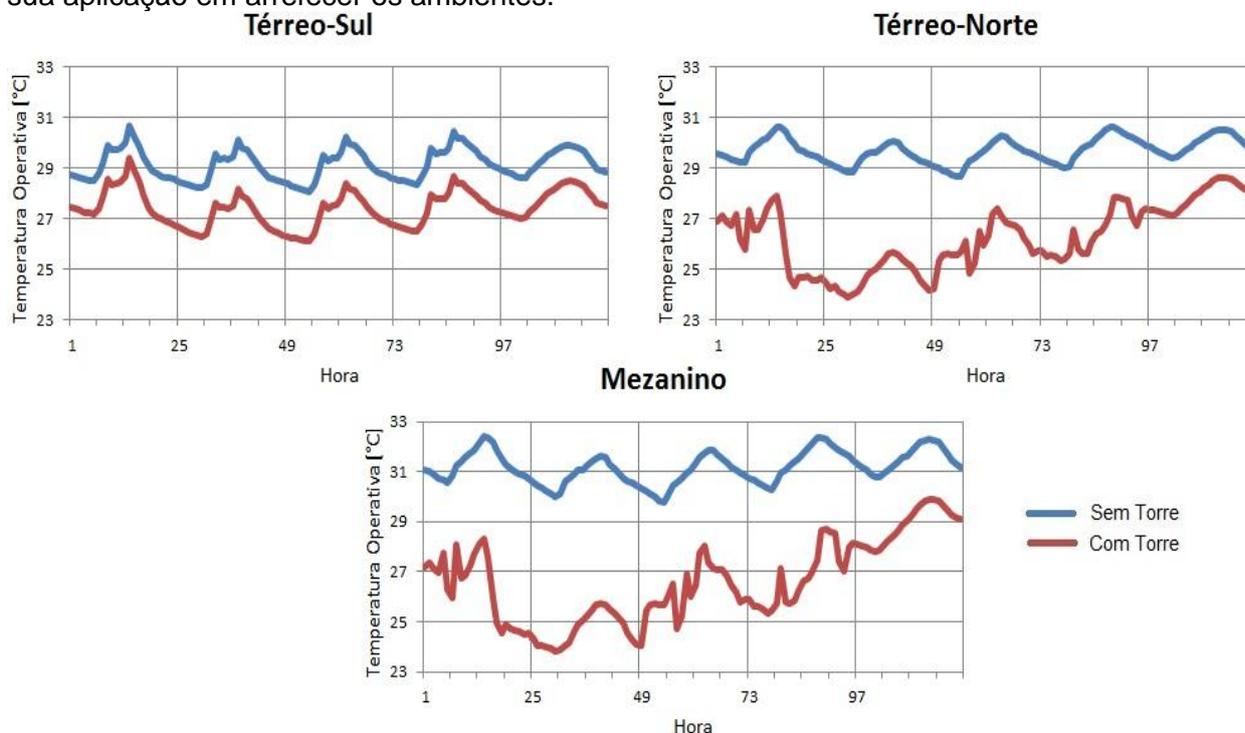


Figura 6.2 – Temperaturas operativas durante a semana climática mais quente

6.3. Transformação de Energia no Sítio

O Prédio de Energia Líquida Zero atinge a meta, em escala anual, de balanço negativo de energia devido às alternativas de eficiência energética adotadas e por causa do arranjo de módulos fotovoltaicos instalados sobre a cobertura, proporcionando a transformação de energia e utilização da mesma no sítio.

Para tanto, foram selecionados 22 módulos Kyocera de 205 Wp (Anexo A5), ocupando uma área total de 32,67 m², que resultaram em uma produção de energia elétrica, através da transformação fotovoltaica, como ilustrado na Figura abaixo:

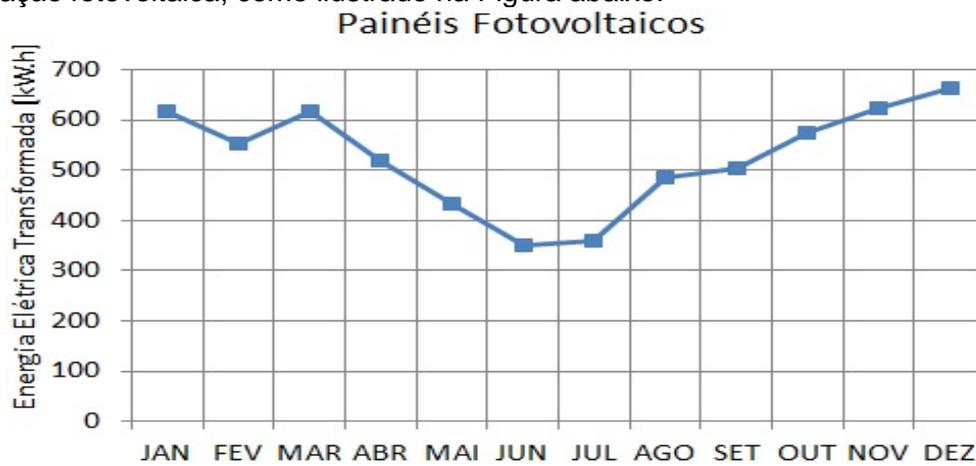


Figura 6.3 – Energia transformada no local

No ano todo foram 6298 kW.h de energia elétrica produzida pelo arranjo fotovoltaico. Para efeito de comparação, a Figura 6.4 a seguir ilustra o desempenho dos módulos fotovoltaicos para o solstício de verão e solstício de inverno.



Figura 6.4 – Desempenho do arranjo fotovoltaico nos dias de solstício

6.4. Conforto Térmico

A Figura 6.5 a seguir mostra as temperaturas operativas ao longo do ano em cada zona do Prédio de Energia Líquida Zero:

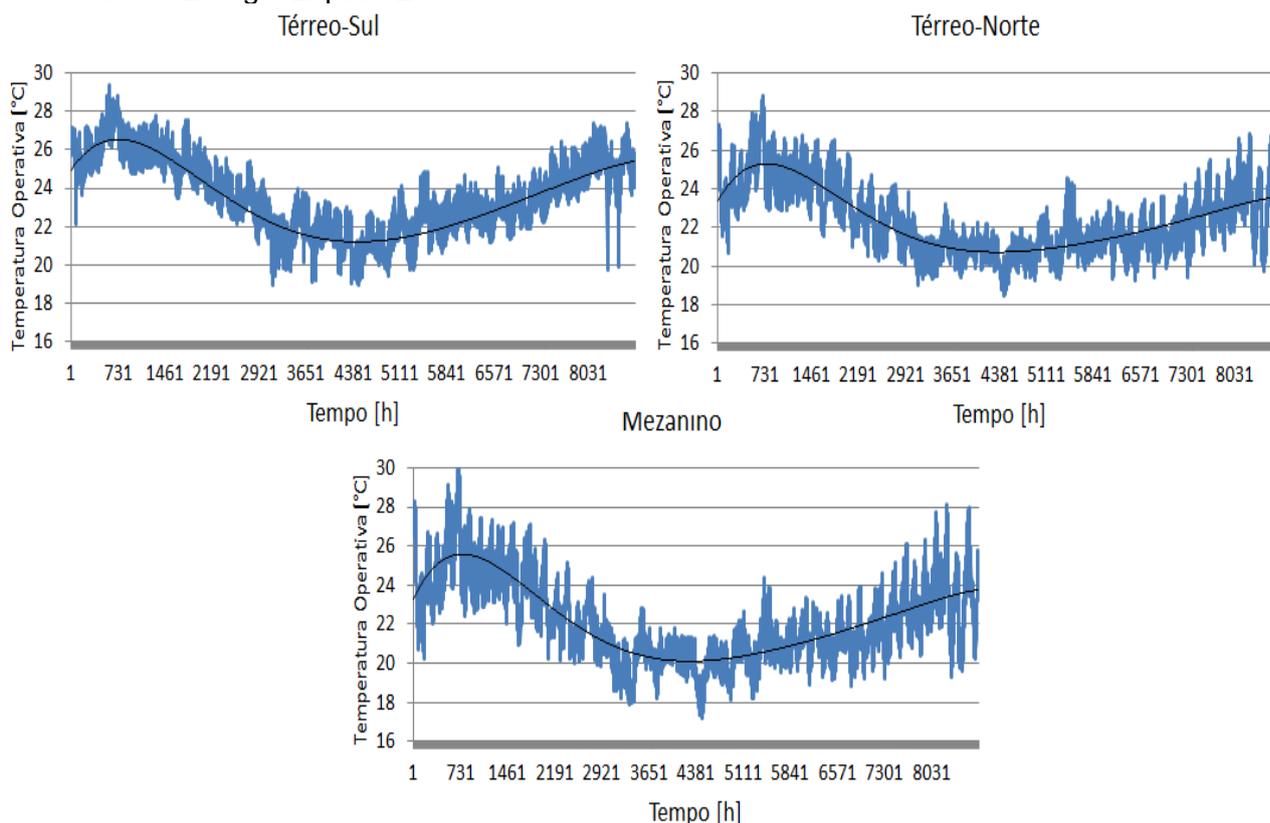


Figura 6.5 – Temperatura operativa anual para as zonas do Prédio de Energia Líquida Zero

Considerando a norma ASHRAE 90.1-2007 que estabelece o intervalo aceitável de temperaturas operativas para conforto térmico, em no máximo de 300 horas durante a ocupação ao longo do ano, ilustrado anteriormente pela Figura 5.7, e considerando as temperaturas operativas das zonas durante as 10 horas diárias de ocupação, chegam-se aos seguintes resultados, descritos na tabela 6.1 a seguir:

Tabela 6.1 – Dados relativos às temperaturas operativas e condições de conforto térmico

OCUPAÇÃO	Térreo-Sul	Mezanino	Térreo-Norte
Temperatura Mínima [°C]	19,0	17,9	19,0
Temperatura Máxima [°C]	29,3	29,8	28,6
Amplitude Térmica [°C]	10,3	11,9	9,6
DESCONFORTO	Térreo-Sul	Mezanino	Térreo-Norte
Inverno [horas]	5	124	20
Verão [horas]	36	17	5
Total [horas]	41	141	25

Segundo a norma, o limite inferior para a faixa de conforto térmico é de 19,5 °C, ocorrendo um total de 149 horas de desconforto. O limite superior para a faixa conforto térmico é de 28 °C, ocorrendo um total de 58 horas de desconforto. No total, ocorreram 207 horas de desconforto durante o tempo de ocupação ao longo do ano, resultado este satisfatório e dentro dos padrões exigidos pela norma.

6.5. Consumo e Balanço de Energia em Escala Anual

O consumo energético do Prédio de Energia Líquida Zero é realizado pelos: equipamentos elétricos (*notebooks*, impressora, micro-ondas e cafeteira), equipamento exterior (frigobar), luzes internas (lâmpadas led) e pela bomba da torre de arrefecimento.

Considerando os consumos energéticos mencionados e a capacidade de transformar energia da radiação solar em energia elétrica, a Figura 6.6 abaixo ilustra este balanço:

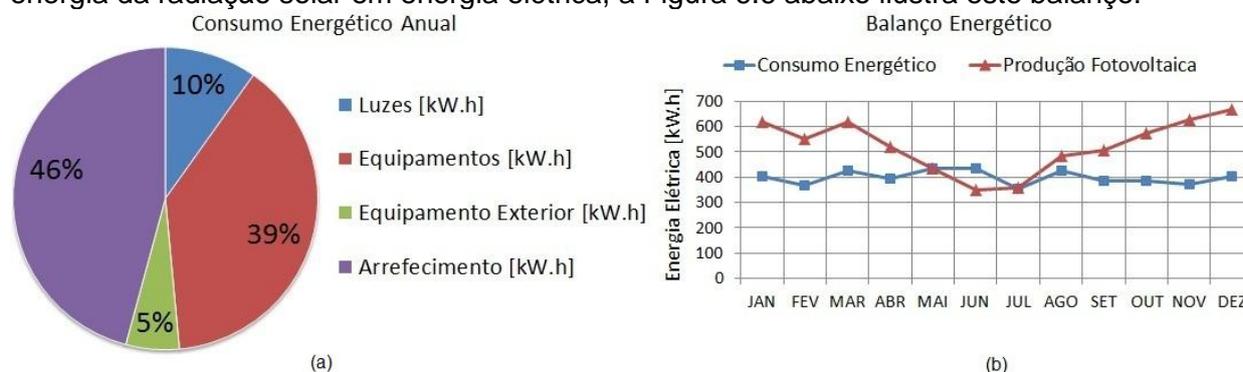


Figura 6.6 (a) – Consumo energético; Figura 6.6 (b) – Balanço energético

Realizando um balanço de energia, em escala anual, para o Prédio de Energia Líquida Zero, onde, foram consumidos 4781 kW.h e gerados 6298 kW.h de energia elétrica, resulta num balanço líquido de -1517 kW.h para toda a edificação.

6.6. Custo Energético

Realizou-se a simulação dos gastos com energia elétrica para as tarifas Horó-Sazonal Azul (HSA) e Horó-Sazonal Verde (HSV) [CEEE, 2011], desconsiderando a produção de energia fotovoltaica. Para a tarifa HSA o custo total anual foi de R\$ 1880,43 e, para a tarifa HSV o custo total anual foi de R\$ 1135,67. Considerando a instalação de painéis fotovoltaicos, fazendo o balanço de energia entre produção e consumo, os custos com energia elétrica ocorreram somente nos meses de maio e junho, custando R\$ 38,16. Este valor não ocorrerá se for instalado um banco de baterias para armazenar a produção de energia elétrica para os meses de maior demanda ou se, no Brasil, existissem leis que estabelecessem a cogeração de energia elétrica, podendo o PELZ, enviar energia elétrica para a rede.

7. CONCLUSÕES

O maior resultado para o projeto foi o balanço de energia líquida menor do que zero, resultando em -1517 kW.h, significando que a produção de energia no sítio foi maior do que a energia demandada.

A utilização de equipamentos eficientes e respectivos perfis de uso, tais como *notebooks*, reduziram o consumo de energia, se comparados à utilização de *desktops*. O controle de iluminação proporcionou, também, grandes economias na conta de luz do PELZ, uma vez que, em grande parte do período de verão, onde ocorre maior incidência de sol e consequentemente maior iluminação natural, proporcionaram dias e até mesmo semanas onde a iluminação artificial não foi utilizada mantendo-se o conforto lumínico, baseado nas normas que abordam o assunto. A utilização de prateleiras de luz auxiliou a homogeneização da iluminação nos ambientes, reduzindo picos de iluminância perto das janelas e refletindo luz pelos ambientes até o centro da edificação. Esta estratégia, juntamente com o controle eficiente da iluminação, através de sensores, possibilitou as economias energéticas.

Os painéis fotovoltaicos conseguiram suprir a demanda energética do prédio, além de servir como sombreamento para a zona térreo-norte, diminuindo em parte os ganhos de calor. A utilização do modelo adotado para a simulação dos painéis fotovoltaicos foi considerada eficaz e condiz com a realidade, uma vez que utiliza as características da simulação computacional, como o arquivo climático, a incidência de radiação solar e o efeito de sombras nos módulos juntamente com equações e parâmetros empíricos que surgiram de testes e experimentos em laboratório, tornando-se um modelo confiável para tal aplicação.

O sombreamento sobre a zona térreo-norte poderá ser adotado para toda a cobertura, ficando como sugestão para novas simulações as consequências desta aplicação. Ainda, sugere-se a inversão de orientação das janelas mais altas do mezanino, que estão posicionadas para sul. Voltadas para o norte poderão captar maiores índices de iluminação e também reduzir as horas de desconforto no inverno, que surge como fator a ser melhorado.

A utilização da torre evaporativa foi uma estratégia adotada para arrefecer os ambientes das elevadas temperaturas as quais eles se encontravam. Considerando a utilização contínua da bomba de água, o principal fator de consumo energético no PELZ, esta aplicação resultou em bons resultados para a diminuição das temperaturas interiores, podendo ser melhorada, juntamente com a ventilação natural, para proporcionar maior conforto aos ocupantes.

Buscando a eficiência energética, seria necessário também, um ambiente interno propício para a realização de atividades. Tanto o conforto lumínico, controlado através dos níveis de iluminância, como o conforto térmico, baseado nas temperaturas operativas, tiveram bons resultados. As temperaturas tiveram alguns picos elevados, porém, tal comportamento térmico da edificação esteve dentro dos limites descritos em norma.

Para a aplicação de energia solar fotovoltaica, está em tramitação a criação de leis nacionais que buscam este incentivo para sistemas conectados à rede, na forma de cogeração com a concessionária de energia elétrica. Neste caso o sistema fotovoltaico do PELZ forneceria energia elétrica para a habitação, e no caso de excedente, este seria enviado para a rede, podendo gerar lucros, que em um ano poderiam chegar a R\$ 679,00.

A convergência de conhecimentos técnicos com o trabalho conjunto de profissionais proporciona a inovação e aplicação de estratégias que tornem as edificações mais eficientes. Isto se torna fundamental para o desenvolvimento de um Prédio de Energia Líquida Zero porque ele exige conhecimento especializado e um projeto integrado de suas partes e, para isto, a simulação serve de ferramenta para prever e analisar os efeitos das estratégias de projeto, além de proporcionar a análise e comparação dos resultados, verificando causas e consequências para o comportamento dos sistemas da edificação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE. “**Fundamentals Handbook**”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, SI Edition. EUA. 2009.

ASHRAE. “**Standard 55.1 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**”. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, SI Edition. EUA. 2004.

ASHRAE. “**Standard 90.1 – Energy Standard for Buildings except Low-Rise Residential Buildings**”. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, SI Edition. EUA. 2007.

ABNT-NBR 5413. “**Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 5413 – Iluminação de Interiores**”. Rio de Janeiro, Brasil. 1992.

BEYER. “**Apostila de Conforto Térmico**”. DEMEC/UFRGS. Paulo Otto Beyer, 2010.

CEEE. “**Tarifas e Custos de Energia Elétrica: Horo-Sazonal Azul e Verde**”, <http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/Controller.aspx?CC=1782>. Acessado em 20/10/2011.

DOE. Disponibilizado pelo **U.S. Department of Energy**. Download do programa *EnergyPlus* e *plugin Open Studio*. <http://www.energy.gov>. Acessado em 25/03/2011.

ELETROBRAS. “**PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**”. Consumo de eletrodomésticos. <http://www.eletronbras.gov.br/procel>. Acessado em 20/09/2011.

ENERGYPLUS. “**EnergyPlus Engineering Reference**”. U.S. Department of Energy. 2011.

GOOGLE. Disponibilizado pelo **Google**. Download do programa *Google Sketchup*. <http://sketchup.google.com>. Acessado em 25/02/2010.

HAGEL. “**Análise computacional da demanda energética de climatização de edifício**”. Arone de Paula Lira Alves Hagel. Trabalho de Conclusão de Curso – ENM/UnB. 2005.

KING, D.L., Boyson, W.E., Kratochvil, J.A. “**Photovoltaic Array Performance Model**”. Sandia National Laboratories. Estados Unidos. 2003.

KYOCERA. “**Linha de Produtos – Módulos Fotovoltaicos**”. 2011.

LABEEE. “**Arquivos Climáticos**”, <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>. Acessado em 10/04/2011.

LIBERALI. “**Simulação para estudo do envoltório de um prédio**”. Ricciano Liberali. Trabalho de Conclusão de Curso – DEMEC/UFRGS. 2010.

MME. “**Ministério de Minas e Energia**”. Leis de Eficiência Energética desenvolvidas pelo Governo Brasileiro. <http://www.mme.gov.br>. Acessado em 15/08/2011.

PHILIPS. “**Lâmpadas LED Philips**”. 2010

USGBC. “**United States Green Building Council – LEED**”. <http://www.usgbc.org>. Acessado em 16/07/2011.

ZANESCO, I., MOEHLECKE, A., SEVERO, T. C., SANTOS JUNIOR, S.L.R., ZENZEN, E. A., EBERHARDT, D.. “**Implementação e análise de sistemas fotovoltaicos autônomos**”. Anais do X Congresso Brasileiro de Energia, 2004.

ANEXOS

ANEXO A1 – Planta baixa do PELZ

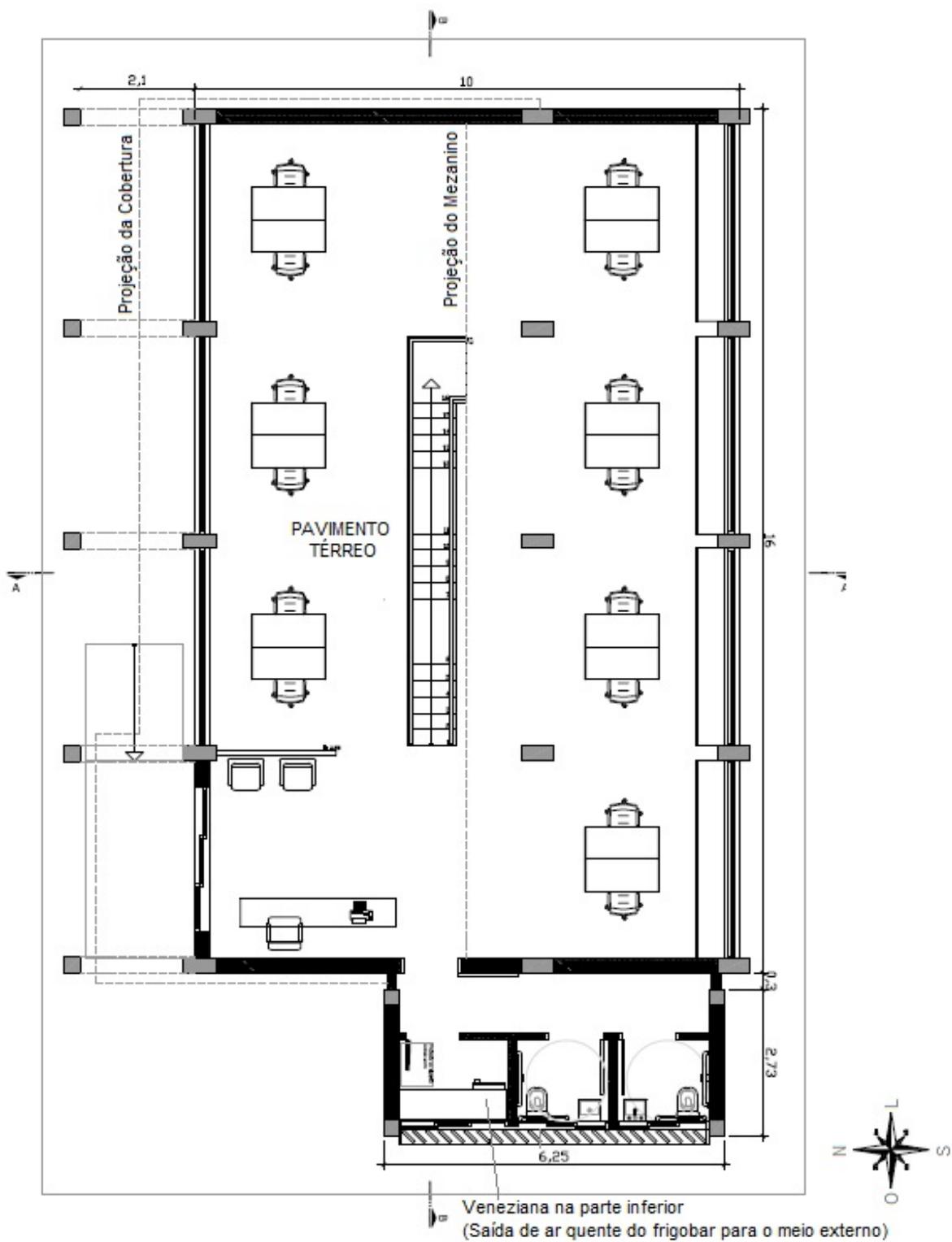


Figura A1 – Planta baixa do pavimento térreo

ANEXO A2 – Vista em corte do Prédio de Energia Líquida Zero

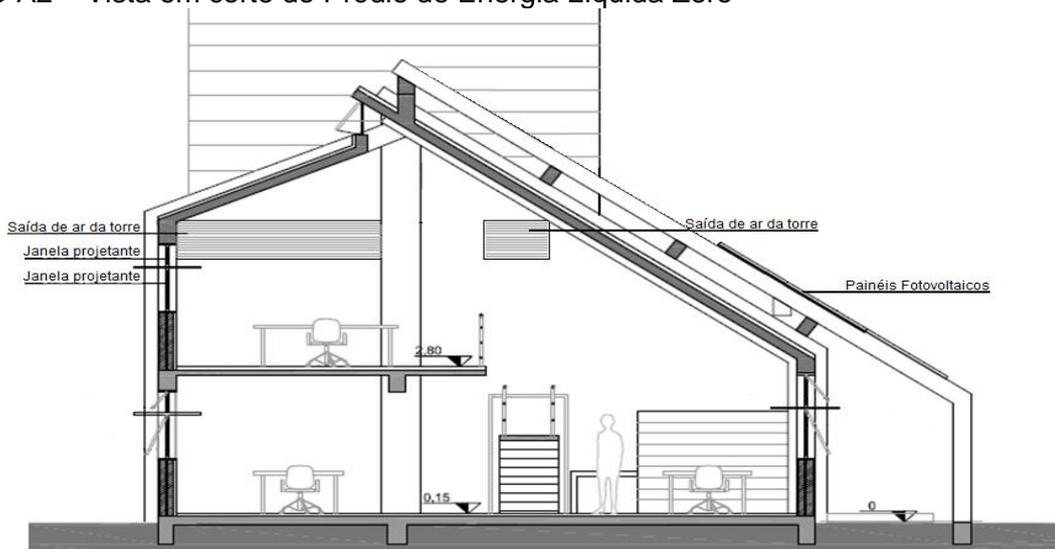


Figura A2 – Corte AA do Prédio de Energia Líquida Zero

ANEXO A3 – Vistas do Prédio de Energia Líquida Zero (PELZ)



Figura A3 (a) – Vista nordeste ; Figura A3 (b) – Vista sudoeste

ANEXO A4 – Especificações dos Módulos Fotovoltaicos

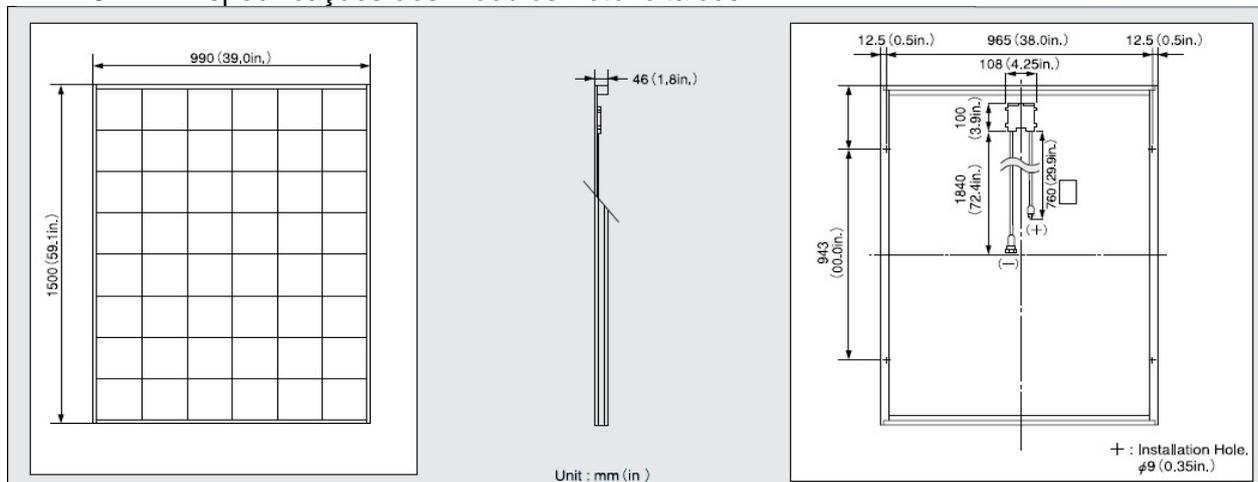


Figura A4 – Dimensões do módulo fotovoltaico

Tabela A4 – Especificações do módulo fotovoltaico

■ Specifications	
■ Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)	
Maximum Power (P _{max})	205W (+5W/-0W)
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	26,6V
Maximum Power Current (I _{mpp})	7,71A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	33,2V
Short Circuit Current (I _{sc})	8,36A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of V _{oc}	-1,20×10 ⁻¹ V/°C
Temperature Coefficient of I _{sc}	5,02×10 ⁻³ A/°C
<small>*STC : Irradiance 1000W/m², AM1,5 spectrum, cell temperature 25°C</small>	
■ Electrical Performance at 800W/m², *NOCT, AM1,5	
Maximum Power (P _{max})	145W
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	23,6V
Maximum Power Current (I _{mpp})	6,17A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	30,0V
Short Circuit Current (I _{sc})	6,78A
<small>*NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47,9°C</small>	
■ Cells	
Number per Module	54
■ Module Characteristics	
Length × Width × Depth	1600mm(59.1in)×990mm(39.0in)×46mm(1.8in)
Weight	18kg(39.7lbs.)
Cable	(+)760mm(29.9in),(-)1840mm(72.4in)
■ Junction Box Characteristics	
Length × Width × Depth	100mm(3.9in)×108mm(4.3in)×15mm(0.6in)
IP Code	IP65
■ Others	
*Operating Temperature	-40°C~90°C
Maximum Fuse	15A
<small>*This temperature is based on cell temperature,</small>	

APÊNDICES

APÊNDICE A – Dados de Entrada no *Software EnergyPlus*

Tabela A – Informações descritas no *software*

Dados de Entrada no <i>Software Energy Plus</i>					
Temperature Convergence Tolerance Value: 0,4		Loads Convergence Tolerance Value = 0,04			
Localização: Porto Alegre - Lat.: -30° ; Long.: -51,2° ; Time Zone: -3 h ; Elevation 4 m					
Cronograma	Ocupação	Iluminação	Equipamentos	Torre	
Dias da Semana	8h às 18h	Durante ocupação c/ setpoint	Durante ocupação	Sempre Ativa	
Fim de Semana	não	não	não	Desligada	
Construções : Montagem da camada externa para a camada interna					
Paredes Externas	25 mm stucco	100 mm brick	75 mm insulation	100 mm brick	25 mm stucco
Paredes Internas	25 mm stucco	100 mm brick	75 mm insulation	100 mm brick	25 mm stucco
Piso	300 mm brick	200 mm concrete			
Piso Interno	Acoustic tile	Air space resistance	100mm concrete		
Cobertura	Vaporpermeable felt	25 mm stucco	75 mm Insulation	100 mm concrete	25 mm stucco
Janelas	Cebrace SKN	13 mm Air	Clear 3 mm		
Vidro Clear	Thickness = 0,003 m ; Solar Transmittance = 0,837 ; Visible Transmittance = 0,898 ; Conductivity = 0,9 W/m.K				
Vidro Cebrace SKN	Thickness = 0,009 m ; Solar Transmittance = 0,239 ; Visible Transmittance = 0,507 ; Conductivity = 0,9 W/m.K				
Painéis Fotovoltaicos	Exterior Natural Vented Cavity - Sandia Database Parameters - Active Area = 32,67 m ² ; 22 Modules in Parallel ; Inverter Efficiency = 1				
Controle de Iluminação	Control Points = 2 ; Fraction of Zone Control = 50 % ; Illuminance Setpoint = 500 lux ; Min. Input Power = 0,3 ; Min. Light Power = 0,2				
Torre Evaporativa	Water Flow Rate = 0,001667 m ³ /s ; Tower Height = 7 m ; Air Flow Rate = 2 m ³ /s ; Temperature Setpoint = 22 °C ; Rated Power = 200 W				
Coleta de Água da Chuva	Max. Capacity (storage) = 5 m ³ ; Initial Volume = 2,5 m ³ ; Collection Loss Factor = 0,1				
Ganhos Internos de Calor					
Pessoas	Zone Floor Area per Person = 11,6 m ² /person ; Fraction Radiant = 0,5 ; Office Activity				
Luzes	Watts per Zone Floor Area = 12 W/m ² ; Fraction Radiant = 0,37 ; Fraction Visible = 0,36 ; LED				
Equipamentos	Watts per Person = 20 W/person (notebooks) ; Other Equipment: 1825 W ; Fraction Radiant = 0,2				

APÊNDICE B – Simulação da iluminação do Prédio de Energia Líquida Zero

Cada zona do prédio possui 2 sensores onde cada um controla metade da área de iluminação. O posicionamento está definido de tal forma para os controles possam atuar na iluminação na região central do ambiente e na região periferal, perto das janelas. O *setpoint* adotado é de 500 lux, definido por norma para ambientes de escritório.

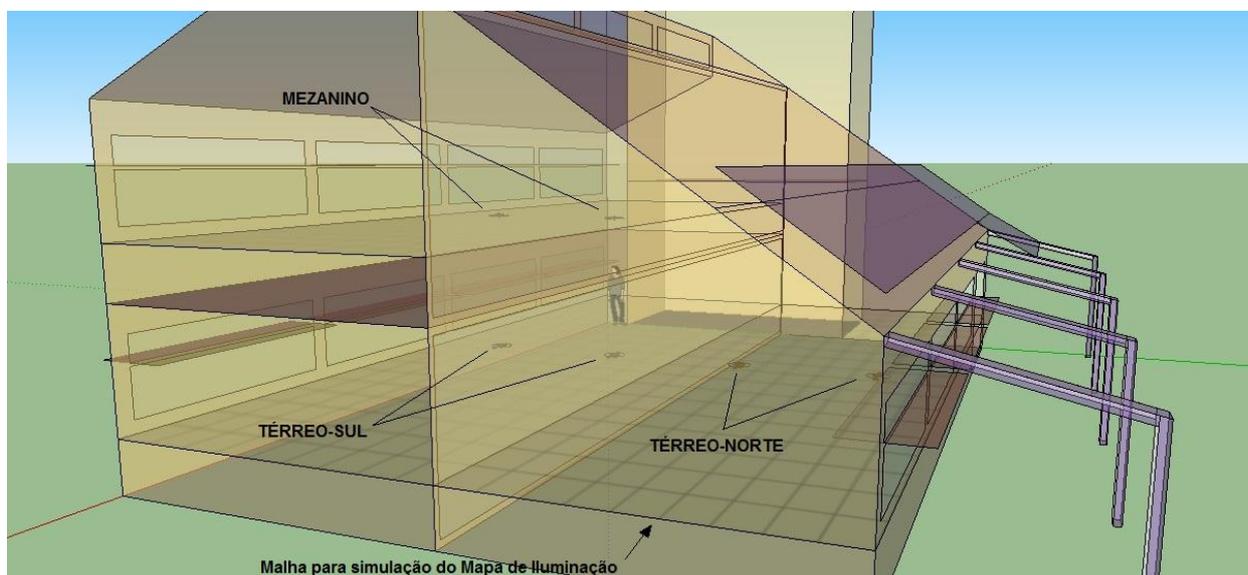


Figura B – Disposição dos sensores fotoelétricos e malha para simulação dos mapas de iluminação

APÊNDICE C – Reaproveitamento das águas

Toda a superfície inclinada da cobertura, tanto o lado sul como o lado norte, servem de anteparo para a água proveniente das chuvas. Acima da linha de módulos fotovoltaicos está posicionada uma calha para realizar o escoamento destas águas até o reservatório, localizado no forro da zona de serviços (banheiros e copa). Como a calha está acima do nível deste reservatório, o escoamento ocorre por gravidade.

Coleta de água da chuva

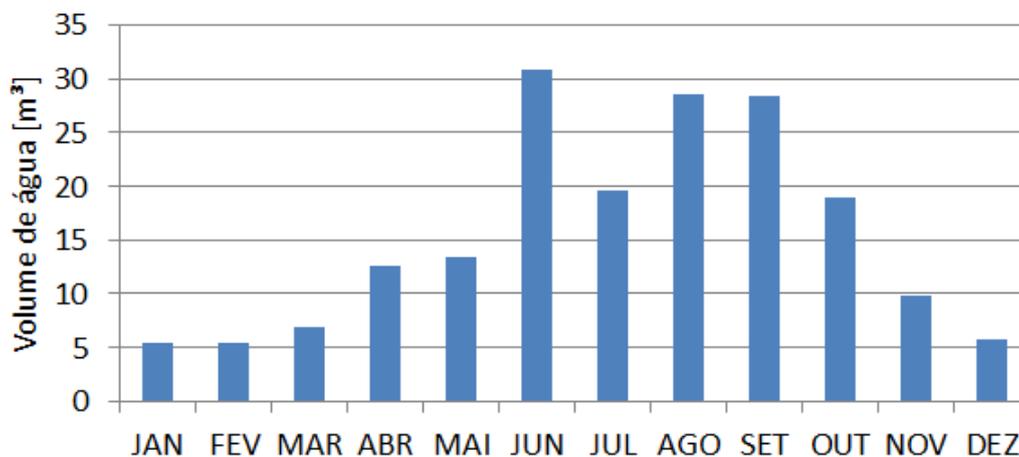


Figura C – Volume de água coletado mensalmente ao longo do ano

APÊNDICE D – Simulação das tarifas de consumo de energia elétrica

Para efeitos comparativos foi realizada a projeção de custos financeiros e consumo energético para o Prédio de Energia Líquida Zero de acordo com as tarifas da concessionária de energia elétrica para prédios comerciais.

O campo “Energia Líquida (kW.h)” se refere ao balanço de energia com a utilização da energia produzida pelos módulos fotovoltaicos.

Tabela D (1) – Projeção de custos e consumo para tarifa Horo-Sazonal Verde

HOROSAZONAL VERDE													
CUSTO (R\$)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
Custo de Energia	83,75	79,58	99,46	95,8	108,83	108,55	90,71	107,96	98,53	96,43	81,89	84,18	1135,67
CONSUMO (R\$)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
Consumo Ponta Úmida	26,77	24,22	27,63	23,24	0	0	0	0	0	0	0	27,28	129,13
Consumo Ponta Seca	0	0	0	0	26,57	26,07	18,35	26,72	24,85	25,13	25,13	0	172,82
Fora de Ponta Úmida	48,3	43,8	50,83	47,14	0	0	0	0	0	0	0	48,31	238,38
Fora de Ponta Seca	0	0	0	0	56,85	57,06	46,99	55,86	50,03	50,37	48,25	0	365,4
Demanda	8,68	11,56	20,99	25,42	25,42	25,42	25,37	25,37	23,65	20,94	8,51	8,6	229,94
ENERGIA (kW.h)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
Energia Total	403,38	366,11	424,44	391,32	433,94	435,04	355,26	427	383,29	385,99	370,76	404,32	4780,85
Demanda Total	1,03	1,37	2,49	3,02	3,02	3,02	3,01	3,01	2,81	2,49	1,01	1,02	27,31
Pico de Energia	25,85	23,39	26,68	22,44	25,18	24,71	17,39	25,34	23,56	23,82	23,82	26,34	288,55
Pico de Demanda	0,6155	0,6155	0,6155	0,5905	0,5905	0,5905	0,5855	0,5855	0,5955	0,5955	0,5955	0,6055	7,18
ENERGIA LÍQUIDA (kW.h)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
Energia Total	-213,2	-183,3	-193,1	-125,3	0,5679	84,21	-4,6	-56,8	-122,5	-186,8	-254,3	-261,5	-1516,6

Tabela D (2) – Projeção de custos e consumo para tarifa Horo-Sazonal Azul

HOROSAZONAL AZUL													
CUSTO (R\$)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
Custo de Energia	99,32	109,59	167,17	186,05	196,79	196,9	185,02	195,61	180,25	166,31	98,44	98,98	1880,43
CONSUMO (R\$)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
Consumo Ponta Úmida	5,07	4,59	5,23	4,4	0	0	0	0	0	0	0	5,17	24,46
Consumo Ponta Seca	0	0	0	0	5,43	5,33	3,75	5,46	5,08	5,13	5,13	0	35,31
Fora de Ponta Úmida	48,3	43,8	50,83	47,14	0	0	0	0	0	0	0	48,31	238,38
Fora de Ponta Seca	0	0	0	0	56,85	57,06	46,99	55,86	50,03	50,37	48,25	0	365,4
Demanda de Ponta	37,27	49,63	90,11	109,09	109,09	109,09	108,91	108,91	101,5	89,87	36,55	36,91	986,95
Demanda Fora de Ponta	8,68	11,56	20,99	25,42	25,42	25,42	25,37	25,37	23,65	20,94	8,51	8,6	229,94
ENERGIA (kW.h)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
Energia Total	403,38	366,11	424,44	391,32	433,94	435,04	355,26	427	383,29	385,99	370,76	404,32	4780,85
Demanda Total	1,03	1,37	2,49	3,02	3,02	3,02	3,01	3,01	2,81	2,49	1,01	1,02	27,31
Pico de Energia	25,85	23,39	26,68	22,44	25,18	24,71	17,39	25,34	23,56	23,82	23,82	26,34	288,55
Pico de Demanda	0,6155	0,6155	0,6155	0,5905	0,5905	0,5905	0,5855	0,5855	0,5955	0,5955	0,5955	0,6055	7,18
ENERGIA LÍQUIDA (kW.h)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
Energia Total	-213,2	-183,3	-193,1	-125,3	0,5679	84,21	-4,6	-56,8	-122,5	-186,8	-254,3	-261,5	-1516,6

APÊNDICE E – Simulação para cogeração de energia elétrica junto a concessionária

Existindo, no país, legislação que regulamentasse a cogeração de energia, o PELZ poderia “vender” energia elétrica, por causa do excedente produzido, conforme ilustra a Tabela E a seguir.

Tabela E – Simulação para cogeração de energia elétrica e balanço financeiro

COGERAÇÃO ATRAVÉS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS													
ENERGIA (kW.h)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
Excedente Injetado na Rede	213,2	183,3	193,1	125,3	0	0	4,6	56,8	122,5	186,8	254,3	261,5	1601,4
COGERAÇÃO DE ENERGIA (R\$)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
Balanço Financeiro	95,51	82,12	86,51	56,13	-0,26	-37,73	2,06	25,45	54,88	83,69	113,93	117,15	679,44