

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA ÊNFASE ELETROTÉCNICA

ALLAN RODRIGO DE OLIVEIRA
HENRIQUE MARIN CAMPOS
JOAO GUILHERME AMARANTE

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO ESCRITÓRIO VERDE DA
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, CÂMPUS CURITIBA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2013

ALLAN RODRIGO DE OLIVEIRA
HENRIQUE MARIN CAMPOS
JOAO GUILHERME AMARANTE

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO ESCRITÓRIO VERDE DA
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, CÂMPUS CURITIBA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC2), do curso de Engenharia Industrial Elétrica Ênfase Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Curitiba, como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro.

Orientadora: Profa. Maria de Fátima Ribeiro Raia, Dr. Eng.

CURITIBA
2013

ALLAN RODRIGO DE OLIVEIRA
HENRIQUE MARIN CAMPOS
JOAO GUILHERME AMARANTE

Estudo da eficiência energética do Escritório Verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 02 de maio de 2013.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Coordenadora dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Maria de Fátima Ribeiro Raia, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Jair Urbanetz Junior
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carlos Henrique Karam Salata
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rubens Martins Vianna Junior
Smartlar Automação Residencial

Maria de Fátima Ribeiro Raia, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos colaboradores diretos deste trabalho: a orientadora Profa. Dra. Maria de Fátima Ribeiro Raia pelo apoio e pelas correções que foram extremamente pertinentes; ao Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior que está engajado com o projeto do Escritório Verde e auxiliou no desenvolvimento deste trabalho com sua metodologia e didática; ao Prof. Esp. Carlos Henrique Karam Salata que fez correções e comentários de extrema importância para esta monografia; ao Prof. Dr. Eloy Casagrande Junior, idealizador e coordenador do Escritório Verde, sem o qual este trabalho não seria possível; ao Eng. Rubens Martins Vianna Junior, que acompanhou de perto o trabalho, disponibilizando o seu conhecimento, os seus materiais, a sua dedicação, e que contribuiu muito com o desenvolvimento desta monografia.

Agradecemos aos que contribuíram indiretamente e tornaram esta monografia possível, que foram as dezenas de empresas parceiras, que contribuíram com o Escritório Verde, além da própria UTFPR que cedeu o espaço e apoiou o projeto do Escritório, o Lactec que forneceu as baterias que viabilizaram o Sistema Fotovoltaico Isolado, e mais os trabalhadores e colaboradores que facilitaram a elaboração de pesquisas para divulgação do projeto modelo em sustentabilidade, que é o Escritório Verde. A todos os que contribuíram, embora não tenham sido citados, deixamos os nossos sinceros agradecimentos.

Um especial agradecimento aos amigos (as) e familiares que cooperaram e nos entenderam nos momentos de ausência para a elaboração deste estudo, saibam que todos vocês são muito importantes em nossas vidas.

RESUMO

OLIVEIRA, Allan R.. CAMPOS, Henrique M. v. d. B.. AMARANTE, João G.. Estudo da eficiência energética do Escritório Verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba. 2013. 256 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Industrial Elétrica – ênfase em Eletrotécnica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

O Escritório Verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba, é localizado nas dependências do bloco V, na Avenida Silva Jardim. O idealizador e coordenador deste projeto, que foi premiado pela ONU na Coréia do Sul em 2012, é o prof. Dr. Eloy Casagrande Junior. O EV é um modelo em sustentabilidade no âmbito da exploração de recursos para a construção civil e geração de energia. Este e outros assuntos, que remetem a sustentabilidade, vêm ganhando espaço cada vez maior nas universidades, empresas e na sociedade como um todo. Isso se deve ao fato de já estarmos sofrendo as consequências de atitudes provenientes do paradigma de depredação ambiental, quando a natureza era considerada apenas uma fonte de recursos para a produção humana, sem considerar os impactos resultantes de cada ação. Este trabalho apresenta uma fundamentação teórica, inicialmente contextualizando e trazendo informações acerca do desenvolvimento sustentável e, em seguida, explicando a geração de energia a partir da radiação solar e a partir do vento. A fundamentação abordou, além disso, a tecnologia LED aplicada a sistemas de iluminação. A etapa seguinte envolveu medições e verificações para estudar os sistemas de geração de energia presentes no EV, além do estudo sobre o sistema de iluminação à base de LEDs. A partir destas medições, os dados obtidos foram organizados na forma de gráficos e/ou tabelas, e a partir de cálculos e simulações, foi possível chegar a conclusões. Primeiramente quanto ao Sistema Fotovoltaico Isolado, que no seu arranjo de 12 V apresenta uma margem de segurança bastante significativa para suprir a moto bomba. No Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede, foi possível concluir que a geração fotovoltaica para o mês de janeiro de 2013 esteve acima do consumo médio do setor residencial brasileiro, sendo viável a sua aplicação. Além disso, foi constatada a eficiência da iluminação a base de LEDs, em termos de iluminância por potência demandada, que se mostrou superior à tecnologia fluorescente.

Palavras-chave: Escritório Verde. Desenvolvimento sustentável. Eficiência energética. Medição e verificação.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Allan R.. CAMPOS, Henrique M. v. d. B.. AMARANTE, João G.. Study about the energy efficiency of the Green Office of Federal Technological University of Parana, Curitiba campus. 2013. 256 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Industrial Elétrica – ênfase em Eletrotécnica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

The Green Office (GO) of Federal Technological University of Parana, Curitiba campus, is located on the premises of block V, Silva Jardim Avenue. The founder and coordinator of this project that was awarded by the UN in South Korea, in 2012 is the professor Eloy Casagrande Junior. The GO is a model of sustainability in the exploitation of resources for the construction and power generation. Nowadays, this and other issues that refer to sustainability have been discussed even more in universities, companies and the society in general. This is because we are already suffering the consequences of attitudes from the paradigm of environmental degradation, when nature was considered just a source of human resources for production, without considering the impacts on ecosystems. This paper presents a theoretical basis, initially talking about sustainable development and then explaining the generation of energy from solar radiation and from the wind. The theory also describes the LED lighting systems. The next step involved checks and measurements to study the power generation systems present in the GO, as well as the study of the lighting system based on LEDs. From these measurements, the data were organized in the form of charts and / or tables, and from calculations and simulations, it was possible to reach conclusions about the results. Firstly, on the Isolated Photovoltaic System, that in its arrangement of 12 V presents a very significant margin of safety to supply the power consumption of the motor pump, in according to its use. Secondly, on the Grid Connected Photovoltaic System it was concluded that the photovoltaic generation for the month of January 2013 was above the average consumption in the residential sector of Brazil, being feasible implementation. Thirdly, it was observed the efficiency of the illumination LEDs base, in terms of the ratio between the illuminance and power demanded, which was superior to fluorescent technology.

Keywords: Green Office. Sustainable development. Energy efficiency. Measurement and verification.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Matriz elétrica brasileira..... | 22 |
| Figura 2 - Participação de renováveis na matriz elétrica | 22 |
| Figura 3 - Emissões de gás carbônico..... | 23 |
| Figura 4 - Exemplos de alguns resultados acumulados do CONPET..... | 28 |
| Figura 5 - Fontes renováveis na matriz energética brasileira | 34 |
| Figura 6 - Vida útil das reservas de petróleo e gás natural..... | 34 |
| Figura 7 - Evolução da produção nacional de etanol anidro e hidratado | 35 |
| Figura 8 - Estratégias para o desenvolvimento sustentável | 36 |
| Figura 9 - Configuração de uma micro-rede | 39 |
| Figura 10 - Sistema de distribuição radial sem GD | 41 |
| Figura 11 - Sistema de distribuição radial com inserção de GD no ponto considerado | 42 |
| Figura 12 - Potência da GD x redução de perdas na linha. | 45 |
| Figura 13 - Potência da GD x redução de perdas na linha em diferentes localizações | 45 |
| Figura 14 - Sistema de aproveitamento de energia térmica para aquecimento de água..... | 47 |
| Figura 15 - Radiação solar global horizontal, média anual | 51 |
| Figura 16 - Radiação solar no plano inclinado..... | 52 |
| Figura 17 - Transferência de elétrons na junção pn | 55 |
| Figura 18 - Célula fotovoltaica de silício monocristalino | 57 |
| Figura 19 - Célula fotovoltaica de silício policristalino..... | 57 |
| Figura 20 - Ilustração dos principais ângulos estudados..... | 60 |
| Figura 21 - Módulo fotovoltaico desconectado da rede | 61 |
| Figura 22 - Módulo fotovoltaico conectado à rede | 61 |
| Figura 23 - Módulo fotovoltaico a base de silício monocristalino | 62 |
| Figura 24 - Curva característica I x V, para célula de silício monocristalino . | 64 |
| Figura 25 - Potência x tensão para célula de silício monocristalino | 64 |
| Figura 26 - Parâmetros de potência máxima..... | 65 |
| Figura 27 - Associação de módulos fotovoltaicos em série | 66 |
| Figura 28 - Associação de módulos fotovoltaicos em paralelo | 67 |

| | |
|--|-----|
| Figura 29 - Variações na curva I x V causadas pela potência luminosa incidente (Ic) | 68 |
| Figura 30 - Variações nas curvas I x V causadas pela temperatura em um módulo fotovoltaico de silício cristalino | 69 |
| Figura 31 - Operação eletromecânica de uma célula. | 71 |
| Figura 32 - Perfil de descarga para baterias de chumbo-ácido, para diferentes valores de corrente de descarga..... | 74 |
| Figura 33 - Capacidade de retenção de carga em função do número de ciclos..... | 75 |
| Figura 34 - Tensão de circuito aberto x estado de carga..... | 75 |
| Figura 35 - Vida útil em função da profundidade de descarga, para diferentes temperaturas | 76 |
| Figura 36 - Curvas de corrente e tensão para o processo de carga..... | 77 |
| Figura 37 - Tensão da célula em função do tempo para diferentes taxas de carga..... | 80 |
| Figura 38 - Tensão da célula em função do tempo para diferentes taxas de descarga..... | 80 |
| Figura 39 - Controlador shunt com LVD opcional | 82 |
| Figura 40 - Controlador série com LVD opcional | 82 |
| Figura 41 - <i>Set points</i> para controlador de carga baseado em tensão | 84 |
| Figura 42 - Formas de onda para diferentes tipos de inversores | 86 |
| Figura 43 - Tensão (Volts) medida na saída do conversor entre Fase A e o Neutro N1 (2,5 ms/Div) | 86 |
| Figura 44 - Aplicação do MPPT para sistema CC e para sistema CA..... | 90 |
| Figura 45 - Perda de potência do BFV em relação ao MPPT para a mesma condição | 91 |
| Figura 46 - Turbina eólica de Brush..... | 97 |
| Figura 47 - Complementaridade entre energia elétrica e hidráulica na região nordeste..... | 98 |
| Figura 48 - Fluxo de ar através de uma área transversal A..... | 99 |
| Figura 49 - Turbina eólica experimental de eixo vertical..... | 103 |
| Figura 50 - Rotor Darrieus | 104 |
| Figura 51 - Pá em processo de modelamento..... | 104 |
| Figura 52 - Componentes básicos de uma turbina eólica..... | 106 |

| | |
|---|-----|
| Figura 53 - Vista do interior da nacele de uma turbina eólica..... | 107 |
| Figura 54 - Caixa Multiplicadora de uma Turbina Eólica | 109 |
| Figura 55 - Núcleo do estator de um gerador de corrente alternada | 111 |
| Figura 56 - Torre de concreto | 112 |
| Figura 57 - Esquema elétrico de um gerador com velocidade constante ... | 113 |
| Figura 58 - Esquema elétrico de um gerador com velocidade variável | 114 |
| Figura 59 - Sistema de geração eólica isolado..... | 116 |
| Figura 60 - Configuração de um sistema eólico híbrido..... | 117 |
| Figura 61 - Turbinas eólicas na comunidade Boa Esperança | 118 |
| Figura 62 - Capacidade de geração eólica instalada no mundo em 2011 .. | 119 |
| Figura 63 - Capacidade anual instalada | 120 |
| Figura 64 - Principais Usinas Eólicas da Região Sul | 120 |
| Figura 65 - Principais Usinas Eólicas da Região Nordeste..... | 121 |
| Figura 66 - Usina Eólica Sangradouro – Osório/RS | 122 |
| Figura 67 - Usina Eólica Rio do Fogo - Rio do Fogo/RN | 122 |
| Figura 68 - A usina de Altamont Pass, na Califórnia | 124 |
| Figura 69 - Lâmpada "terracota"..... | 125 |
| Figura 70 - IRC no valor de 40% | 129 |
| Figura 71 - IRC no valor de 100% | 129 |
| Figura 72 - Intensidade luminosa | 133 |
| Figura 73 - Curva de distribuição de intensidade luminosa | 133 |
| Figura 74 - Iluminância | 136 |
| Figura 75 - Primeira observação do fenômeno de eletroluminescência em um diodo..... | 138 |
| Figura 76 - Estrutura do LED | 141 |
| Figura 77 - Padrão de radiação de superfície de LEDs..... | 141 |
| Figura 78 - Emissão de luz branca a partir de uma LED azul III-nitreto contendo fósforo | 143 |
| Figura 79 - Cores que compõe a luz branca..... | 143 |
| Figura 80 - Principais tecnologias disponíveis no mercado | 146 |
| Figura 81 - Economia de energia versus consumo das lâmpadas | 147 |
| Figura 82 - Módulo fotovoltaico KYOCERA | 152 |
| Figura 83 - Sistema fotovoltaico isolado do EV | 153 |
| Figura 84 - Esquema de ligação dos módulos do SFI | 154 |

| | |
|---|-----|
| Figura 85 - Esquema de ligação do banco de baterias em 24 V | 155 |
| Figura 86 - Esquema de ligação do banco de baterias em 12 V | 156 |
| Figura 87 - Bateria que compõe o banco de baterias do SFI | 157 |
| Figura 88 – Moto bomba Shurflo 8000 | 158 |
| Figura 89 - Diagrama unifilar do SFI, arranjo de 12 V | 159 |
| Figura 90 - Diagrama unifilar do SFI, arranjo de 24V | 159 |
| Figura 91 - Disposição da cisterna e caixa d'água | 161 |
| Figura 92 - Caixa d'água que utiliza a água da chuva | 162 |
| Figura 93 - Tubulação de entrada da caixa d'água..... | 162 |
| Figura 94 - Disjuntor que aciona a moto bomba | 163 |
| Figura 95 - Corrente em relação ao tempo..... | 166 |
| Figura 96 - Tensão em relação ao tempo..... | 166 |
| Figura 97 - Potência em relação ao tempo..... | 167 |
| Figura 98 - Inclinação dos módulos em relação ao telhado..... | 174 |
| Figura 99 - Inclinação do telhado em relação ao plano horizontal..... | 175 |
| Figura 100 - Dados de entrada do programa RADIASOL..... | 176 |
| Figura 101 - Irradiação diária média nos módulos..... | 177 |
| Figura 102 - Módulos fotovoltaicos do EV | 181 |
| Figura 103 - Diagrama unifilar geral do Escritório Verde..... | 182 |
| Figura 104 - Medidores de energia do EV | 182 |
| Figura 105 - Horas de operação do medidor 1 | 183 |
| Figura 106 - Horas de operação do medidor 2 | 183 |
| Figura 107 - Horas de operação do medidor 3 | 184 |
| Figura 108 - Luminária embutida 1 W..... | 188 |
| Figura 109 - Luminária embutida 3 W..... | 188 |
| Figura 110 - Luminária embutida 12 W..... | 189 |
| Figura 111 - Luminária embutida 24W..... | 189 |
| Figura 112 - Luminária pendente 33 W | 190 |
| Figura 113 - Legenda das luminárias | 192 |
| Figura 114 - Disposição das luminárias (Térreo)..... | 193 |
| Figura 115 - Disposição das luminárias (escada e mezanino) | 194 |
| Figura 116 - Luminária pendente PD44-P33LED4K..... | 196 |
| Figura 117 - Luminária pendente EF35-E..... | 196 |
| Figura 118 - Fator de utilização para a luminária EF35-3..... | 202 |

| | |
|--|-----|
| Figura 119 - Luxímetro digital | 204 |
| Figura 120 - Campo de trabalho retangular, iluminado com fontes de luz em padrão regular | 206 |
| Figura 121 - Simulação Luminotécnica – Dados do Ambiente | 210 |
| Figura 122 - Simulação Luminotécnica – Escolha da Luminária | 211 |
| Figura 123 - Simulação Luminotécnica – Parâmetros de projeto | 212 |
| Figura 124 - Simulação Luminotécnica – Resultado..... | 213 |
| Figura 125 - Simulação Luminotécnica – Resultado a..... | 214 |
| Figura 126 - Luminária 2007 2xT16 28W | 216 |
| Figura 127 - Distribuição das luminárias 2007 2xT16 28W | 217 |
| Figura 128 - Método ponto a ponto: primeiro caso | 217 |
| Figura 129 - Iluminância: primeiro caso..... | 218 |
| Figura 130 - Luminária 3450 2xT16 54W | 219 |
| Figura 131 - Distribuição das luminárias 3450 2xT16 54W | 220 |
| Figura 132 - Método ponto a ponto: segundo caso | 220 |
| Figura 133 - Iluminância: segundo caso | 221 |
| Figura 134 - Luminária 3416 2xT16 14W | 222 |
| Figura 135 - Distribuição das luminárias 3416 2xT16 14W | 223 |
| Figura 136 - Método ponto a ponto: terceiro caso | 223 |
| Figura 137 - Iluminância: terceiro caso..... | 224 |
| Figura 138 - Luminária Itaberaba 2xTC-D 18W..... | 224 |
| Figura 139 - Distribuição das luminárias Itaberaba 2xTC-D 18W | 225 |
| Figura 140 - Método ponto a ponto: quarto caso | 226 |
| Figura 141 - Iluminância: quarto caso..... | 226 |
| Figura 142 - Luminária Opala 2xTC-D 26W | 227 |
| Figura 143 - Distribuição das luminárias Opala 2xTC-D 26W | 228 |
| Figura 144 - Método ponto a ponto: quinto caso | 229 |
| Figura 145 - Iluminância: quinto caso | 229 |
| Figura 146 - Comparação da eficiência (lux/W)..... | 231 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Principais resultados das ações da Eletrobras Procel em 2011 .. | 26 |
| Tabela 2 - Indicadores de resultados das ações da Eletrobras Procel em 2011..... | 27 |
| Tabela 3 - Recursos financeiros aplicados no Procel em 2011 | 27 |
| Tabela 4 - Temas sugeridos como prioridades nacionais pela CSD | 30 |
| Tabela 5 - Energia do gap de alguns materiais usados em células fotovoltaicas..... | 54 |
| Tabela 6 - Comparação entre diferentes tipos de baterias | 70 |
| Tabela 7 - Definição das classes de energia | 99 |
| Tabela 8 - Classificação de turbinas eólicas: Tamanho/Potência/Usos | 101 |
| Tabela 9 - Classificação de turbinas eólicas: Tamanho/Diâmetro/Área..... | 102 |
| Tabela 10 - Componentes da turbina eólica | 108 |
| Tabela 11 - Índice de reprodução de cores (IRC)..... | 130 |
| Tabela 12 - Temperatura de cor e IRC | 131 |
| Tabela 13 - Luminância média | 135 |
| Tabela 14 - Ensaio para obtenção da vazão da moto bomba | 161 |
| Tabela 15 - Medição de tensão, corrente e potência em função de t | 164 |
| Tabela 16 - Irradiação diária média no plano horizontal fornecida pelo projeto SWERA | 173 |
| Tabela 17 - Irradiação diária média no plano dos módulos | 177 |
| Tabela 18 - Registros de energia ativa do medidor 1 | 184 |
| Tabela 19 - Registros de energia ativa do medidor 2 | 184 |
| Tabela 20 - Registros de energia ativa do medidor 3 | 185 |
| Tabela 21 - Medições considerando a defasagem para o medidor 1 | 185 |
| Tabela 22 - Medições considerando a defasagem para o medidor 2 | 185 |
| Tabela 23 - Medições considerando a defasagem para o medidor 3 | 185 |
| Tabela 24 – Iluminâncias por classes de tarefas visuais..... | 197 |
| Tabela 25 – Fatores determinantes da iluminância adequada | 198 |
| Tabela 26 – Fatores de depreciação | 199 |
| Tabela 27 – Fatores de reflexão | 199 |
| Tabela 28 – Fatores de reflexão das luminárias EF35-E..... | 203 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 29 - Medição no salão principal | 207 |
| Tabela 30 - Medição na coordenação | 207 |
| Tabela 31 - Medição no café | 207 |
| Tabela 32 - Medição na sala de catálogos | 207 |
| Tabela 33 - Resumo da simulação luminotécnica | 215 |
| Tabela 34 – Comparação de resultados luminotécnicos. | 230 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------------------------|---|
| ABINEE | Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| Alq3 | Alumínio Tris [8-Hidroxiquinolina] |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| ANP | Agência Nacional de Petróleo |
| BEN | Balanço Energético Nacional |
| BFV | <i>Best Fixed Voltage</i> (Melhor Tensão Fixa) |
| CA | Corrente Alternada |
| CAC | Captura e armazenamento de carbono |
| CC | Corrente Contínua |
| CdS | Sulfato de Cádmio |
| CdTe | Telureto de Cádmio |
| CFCs | Cloro Flúor Carbonetos |
| CGIEE | Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética |
| CIE | <i>Commission International de l'Eclairage</i> (Comissão Internacional de Iluminação) |
| CNPE | Conselho Nacional de Política Energética |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| CONPET | Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e do Gás Natural |
| COPEL | Companhia Paranaense de Energia |
| CSD | Comissão para o Desenvolvimento Sustentável |
| Cu(InGa)Se ₂ | Disseleneto de Cobre Índio e Gálio ou CIGS |
| CuInSe ₂ | Disseleneto de Cobre e Índio ou CIS |
| EE | Eficiência Energética |
| ENCE | Etiqueta Nacional de Conservação de Energia |
| EP | Estudos e Projetos |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| EV | Escritório Verde |

| | |
|---------|--|
| FDT | Fundo de Desenvolvimento Tecnológico |
| GaAs | Arseneto de Gálio |
| GD | Geração Distribuída |
| GEFAE | Grupo de Estudos sobre Fontes Alternativas de Energia |
| GO | <i>Green Office</i> (Escritório Verde) |
| GT-GDSF | Grupo de Trabalho de Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IDS | Indicador de Desenvolvimento Sustentável |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) |
| IGBT | <i>Insulated Gates Bipolar Transistors</i> (Transistor Bipolar de Porta Isolada) |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial |
| IRC | Índice de Reprodução de Cor |
| ISEW | <i>Index of Sustainable Economic Welfare</i> (Índice de Bem Estar Econômico Sustentável) |
| LED | <i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz) |
| LVD | <i>Low Voltage Disconnect</i> (Desconexão por baixa tensão) |
| MIPS | <i>Material Intensity per Unit of Service Delivered</i> (Intensidade Material por Unidade de Serviço Prestado) |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| MPPT | <i>Maximum Power Point Tracking</i> (Rastreador do Ponto de Máxima Potência) |
| NBR | Normas Brasileiras |
| NLOS | <i>Non-Line-Of-Sight</i> (Fora Da Linha De Visão) |
| OLED | <i>Organic Light Emitting Diode</i> (Diodo Orgânico Emissor De Luz) |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PBE | Programa Brasileiro de Etiquetagem |
| PCHs | Pequenas Centrais Hidrelétricas |
| PEE | Programa de Eficiência Energética das Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica |

| | |
|---------|---|
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PLED | Diodo Polimérico Emissor De Luz |
| PNEE | Plano Nacional de Eficiência Energética |
| PNUMA | Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente |
| PPV | PolifenilenoVinileno |
| PROCEL | Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica |
| PRODEEM | Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios |
| PROINFA | Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica |
| PWM | <i>Pulse width module</i> (Modulador por Largura de Pulso) |
| RGR | Reserva Global de Reversão |
| RIO+20 | Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável |
| SCR | <i>Silicon Controller Rectifier</i> (Retificador Controlador de Silício) |
| SFCR | Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede |
| SFI | Sistema Fotovoltaico Isolado |
| Si | Silício |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| SWERA | <i>Solar and Wind Energy Resources Assessment</i> (Dados de fontes de energia solar e eólica) |
| TPD | Trifenil-Diamina Derivado |
| UTFPR | Universidade Tecnológica Federal do Paraná |
| WOLED | <i>White Organic Light Emitting Diode</i> (Diodo Orgânico Emissor de Luz Branca) |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | TEMA | 13 |
| 1.1.1 | Delimitação do Tema | 13 |
| 1.2 | PROBLEMA E PREMISSAS | 13 |
| 1.3 | OBJETIVOS | 15 |
| 1.3.1 | Objetivo Geral | 15 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos | 15 |
| 1.4 | JUSTIFICATIVA | 15 |
| 1.5 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 16 |
| 1.6 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 17 |
| 2 | DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL | 19 |
| 2.1 | PANORAMA GERAL | 19 |
| 2.2 | PLANO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA | 24 |
| 2.2.1 | Introdução | 24 |
| 2.2.2 | PROCEL, CONPET e PBE | 26 |
| 2.2.3 | Indicadores de desenvolvimento sustentável | 29 |
| 2.3 | SUSTENTABILIDADE: CENÁRIO BRASILEIRO | 32 |
| 2.3.1 | RIO+20: objetivos e resultados esperados | 32 |
| 2.3.2 | Dados de indicadores de desenvolvimento sustentável do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística | 33 |
| 2.3.3 | Conclusões da RIO+20 | 35 |
| 2.3.4 | Soluções para uma maior sustentabilidade | 36 |
| 2.4 | A GERAÇÃO DESCENTRALIZADA DE ENERGIA | 38 |
| 2.4.1 | Geração distribuída | 38 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.5 | APROVEITAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA..... | 46 |
| 2.6 | SÍNTESE DE MEDIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL | 48 |
| 3 | GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RADIAÇÃO SOLAR..... | 50 |
| 3.1 | ATLAS SOLAR BRASILEIRO | 50 |
| 3.2 | ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA | 53 |
| 3.2.1 | Radiação solar | 53 |
| 3.2.2 | Efeito fotovoltaico | 54 |
| 3.2.3 | A célula fotovoltaica | 56 |
| 3.2.4 | Parâmetros importantes quanto à orientação dos módulos | 59 |
| 3.2.5 | Configurações elementares para arranjos fotovoltaicos..... | 60 |
| 3.2.6 | Equipamentos utilizados | 62 |
| 3.3 | PROGRAMAS DE INCENTIVO NO BRASIL | 92 |
| 3.3.1 | Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios | 93 |
| 3.3.2 | Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica | 93 |
| 3.3.3 | Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica (Luz para Todos)..... | 94 |
| 4 | GERAÇÃO EÓLICA..... | 96 |
| 4.1 | EVOLUÇÃO DA ENERGIA EÓLICA NO MUNDO | 96 |
| 4.2 | VENTO E CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA | 98 |
| 4.3 | CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS..... | 101 |
| 4.3.1 | Rotores de eixo vertical..... | 102 |
| 4.3.2 | Rotores de eixo horizontal..... | 104 |
| 4.4 | COMPONENTES DA TURBINA EÓLICA | 105 |
| 4.4.1 | Nacele | 106 |
| 4.4.2 | Pás, cubo e eixo..... | 108 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.4.3 | Caixa Multiplicadora | 109 |
| 4.4.4 | Gerador | 110 |
| 4.4.5 | Torre..... | 111 |
| 4.5 | SISTEMA ELÉTRICO DAS TURBINAS EÓLICAS..... | 112 |
| 4.5.1 | Turbinas eólicas de velocidade constante..... | 112 |
| 4.5.2 | Turbinas eólicas de velocidade variável..... | 114 |
| 4.6 | APLICAÇÕES DE SISTEMAS EÓLICOS | 115 |
| 4.6.1 | Sistema Isolado..... | 115 |
| 4.6.2 | Sistema Híbrido..... | 116 |
| 4.6.3 | Sistema Interligado à rede | 118 |
| 4.7 | IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS | 123 |
| 5 | DIODO EMISSOR DE LUZ..... | 125 |
| 5.1 | HISTÓRICO DA ILUMINAÇÃO | 125 |
| 5.2 | CONCEITOS DE LUMINOTÉCNICA | 127 |
| 5.2.1 | Luz | 127 |
| 5.2.2 | Candela..... | 127 |
| 5.2.3 | Definição de lúmen..... | 128 |
| 5.2.4 | Índice de Reprodução de Cor..... | 128 |
| 5.2.5 | Temperatura de cor..... | 130 |
| 5.2.6 | Fluxo luminoso | 131 |
| 5.2.7 | Intensidade luminosa | 132 |
| 5.2.8 | Curva de distribuição de intensidade luminosa | 133 |
| 5.2.9 | Luminância..... | 134 |
| 5.2.10 | Iluminância | 135 |
| 5.2.11 | Coeficiente de utilização | 136 |
| 5.2.12 | Fator de depreciação | 136 |
| 5.2.13 | Eficiência Luminosa | 137 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.3 | HISTÓRICO DO LED..... | 137 |
| 5.4 | PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO | 140 |
| 5.5 | MATERIAIS E ESTRUTURAS DE DISPOSITIVOS | 140 |
| 5.6 | LED DE LUZ BRANCA | 142 |
| 5.7 | LED ORGÂNICO..... | 143 |
| 5.8 | LEDS APLICADOS À ILUMINAÇÃO..... | 144 |
| 5.9 | CARACTERÍSTICAS DAS LÂMPADAS LED..... | 146 |
| 5.9.1 | Vantagens | 147 |
| 5.9.2 | Desvantagens | 149 |
| 6 | ESTUDO DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA DO | |
| | ESCRITÓRIO VERDE..... | 151 |
| 6.1 | ESTUDO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO | 151 |
| 6.1.1 | Apresentação | 151 |
| 6.2 | O ESTUDO DA MOTOBOMBA..... | 160 |
| 6.2.1 | Objetivo | 160 |
| 6.2.2 | Medição da vazão da moto bomba | 160 |
| 6.2.3 | Medição da corrente, tensão e potência em função do tempo . | 164 |
| 6.2.4 | Energia consumida pela moto bomba | 172 |
| 6.3 | IRRADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA NO PAINEL FOTOVOLTAICO DO EV | |
| | | 173 |
| 6.4 | POTÊNCIA FOTOVOLTAICA DE PICO | 177 |
| 6.4.1 | Observações finais para o sistema fotovoltaico isolado | 178 |
| 6.5 | ESTUDO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE | |
| | ELÉTRICA..... | 180 |
| 6.5.1 | Apresentação | 180 |
| 6.5.2 | Registros das medições | 183 |
| 6.5.3 | Observações finais quanto as medições registradas | 186 |
| 6.6 | SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA | 186 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 7 | ESTUDO LUMINOTÉCNICO DO ESCRITÓRIO VERDE | 187 |
| 7.1 | APRESENTAÇÃO..... | 187 |
| 7.1.1 | Descrição das luminárias | 187 |
| 7.1.2 | Descrição dos ambientes internos | 190 |
| 7.2 | CÁLCULO LUMINOTÉCNICO DO EV | 195 |
| 7.2.1 | Método de Lumens..... | 197 |
| 7.2.2 | Cálculo do fluxo total necessário para o salão principal do EV 200 | |
| 7.2.3 | Cálculo do fluxo total necessário para a sala da coordenação do EV | 201 |
| 7.3 | MEDIÇÃO LUMINOTÉCNICA..... | 203 |
| 7.3.1 | Metodologia..... | 203 |
| 7.3.2 | Resultados | 206 |
| 7.4 | SIMULAÇÃO LUMINOTÉCNICA | 209 |
| 7.4.1 | Utilização do <i>Software</i> Softlux 2.2..... | 209 |
| 7.4.2 | Simulações..... | 214 |
| 7.4.3 | Estudos comparativos | 229 |
| 8 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 232 |
| | REFERÊNCIAS | 234 |
| | ANEXO A - TABELA DE SUBSTITUIÇÃO | 245 |
| | ANEXO B - PLANTAS ARQUITETÔNICAS DO EV | 247 |

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, há uma necessidade crescente de energia elétrica, tanto nos ramos industriais quanto residenciais. Com esse crescimento desenfreado na demanda por energia, é inevitável que profissionais e competentes técnicos repensem sobre os padrões que vem sendo adotados mundialmente, tanto na geração, quanto na transmissão e distribuição da energia elétrica.

No Brasil, temos o privilégio de utilizar a energia a partir dos declives dos rios: as chamadas usinas hidrelétricas, que representaram 81,7% da geração elétrica em 2011 (EPE, 2012). Entretanto, é do conhecimento de todos as complicações advindas da construção de uma usina hidrelétrica, o transtorno gerado para a população local, para os animais e o ecossistema dos rios como um todo. Sem falar que uma hora esse sistema atingirá um esgotamento. O Brasil enfrentou uma questão de grande importância que é a necessidade de expansão da capacidade instalada de energia de 5 GW ao ano (equivalente a construção de uma usina hidrelétrica de Belo Monte a cada dois anos), de forma a possibilitar o crescimento do seu PIB (Produto Interno Bruto) anualmente a uma média de 5% (CHRISTOFOLI, 2011). Não se pode deixar de citar os Estados Unidos, além de inúmeros países europeus, que ainda utilizam o petróleo como matéria-prima principal para geração de energia (CNI, 2007).

É preciso inovar. Não só repensar a forma de gerar energia, mas também a sua distribuição. De que forma os painéis fotovoltaicos reduziriam os impactos no Sistema Interligado Nacional (SIN)? Hoje já se fala nas tecnologias “*Grid On*” e “*Smart Grid*”. Esses são os sistemas em que painéis fotovoltaicos interligados à rede convertem a energia solar em energia elétrica, tornando-a disponível para o consumo.

A fonte de energia solar pode promover o aumento da eficiência energética, uma vez que a geração está próxima ao local de consumo. Caracteriza-se, assim, a chamada geração distribuída (INEE, 2011). A microgeração distribuída situa-se na faixa de potência instalada de até 100 kW, enquanto que a minigeração distribuída contempla potências instaladas acima de 100 kW e menores ou iguais a 1 MW (ANEEL, 2012a). Tal prática implica em reduções da demanda por energia no

sistema elétrico, o que possibilita a postergação de investimentos em ampliação da forma tradicional, que consiste em seguir o conceito de energia firme, que significa energia na maior quantidade e estabilidade possível, através de grandes empreendimentos, como a usina de Itaipu (PLATAFORMA ITAIPU).

Outra tecnologia promissora é o LED, que gera a mesma intensidade luminosa de uma lâmpada fluorescente ou incandescente, com um menor consumo de potência (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2009). Por isso, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas sobre a perspectiva da eficiência energética, que segundo Santos, 2001, “é quando se consegue realizar um serviço e/ou produzir um bem com uma quantidade de energia inferior a que era usualmente consumida”. Este trabalho irá estudar estas novas tecnologias implantadas no Escritório Verde (EV) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Curitiba.

1.1 TEMA

Eficiência energética de uma instalação elétrica.

1.1.1 Delimitação do Tema

Este estudo da eficiência energética será realizado nas instalações elétricas do Escritório Verde, que se encontra nas dependências da UTFPR, Câmpus Curitiba, que é planejado para ser uma construção sustentável.

1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

O Escritório Verde é uma edificação modelo para a sustentabilidade no âmbito da exploração de recursos para a construção civil e geração de energia, premiado pela ONU (Organização das Nações Unidas) na 7ª Conferência dos Centros de Expertise em Educação para o Desenvolvimento Sustentável, na Coreia

do Sul (GAZETA DO POVO, 2012). Sediado na UTFPR, possui a aprovação do Gabinete da Diretoria do Câmpus Curitiba para desenvolver a política de sustentabilidade do Câmpus, unindo pesquisadores, professores, estudantes e pessoal administrativo (ESCRITÓRIO VERDE ONLINE, 2011). A função deste trabalho está, principalmente, em efetuar as medições necessárias que ainda não existem, a partir de um estudo detalhado das novas tecnologias aplicadas. Dessa forma, o trabalho poderá inferir sobre a eficiência energética do edifício, além de apresentar as inovações propostas pelo projeto.

A etapa de medições no EV está condicionada ao final da obra, que estava previsto para outubro de 2011 e acredita-se que até o final, toda a instalação elétrica estará completa, incluindo a fonte auxiliar de energia do local, que serão os painéis fotovoltaicos.

Os medidores de energia já instalados permitirão conhecer o consumo de energia total da instalação. O fornecimento de energia será proveniente, em parte, do painel fotovoltaico conectado a rede, caso haja insuficiência de energia, a COPEL (Companhia Paranaense de Energia) suprirá a demanda necessária da instalação.

A construção e implantação das tecnologias do EV exigem um investimento financeiro acima do padrão do mercado, o que não torna sua aplicação atrativa para ser implantada em larga escala. Porém, a partir de uma conscientização em massa para o uso de novas tecnologias, as empresas poderão perceber um mercado em potencial para produtos mais inteligentes e modernos, o que acarretaria em uma modificação significativa das formas de tratar a energia atualmente. A tendência atual é de iniciação a métodos mais sustentáveis, a partir de incentivos financeiros e materiais para projetos inovadores, para que empresas busquem testar e apresentar suas inovações.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O estudo da eficiência energética do escritório verde da UTFPR, Câmpus Curitiba.

1.3.2 Objetivos Específicos

- estudar o referencial teórico a respeito de desenvolvimento sustentável, sistemas fotovoltaicos, sistemas de geração eólica e iluminação a base de LEDs;
- estudar o Sistema Fotovoltaico Isolado (SFI), que alimenta uma moto bomba para recalque da água da chuva;
- fazer medições e cálculos que possibilitem avaliar o consumo de energia da moto bomba, além do suprimento de energia por parte dos módulos que compõe o SFI;
- estudar o Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede (SFCR), a partir da medição implantada no EV;
- estudar o sistema de iluminação à base de LEDs;
- efetuar medições da iluminância por ambiente para elaborar o estudo comparativo com a tecnologia fluorescente, em termos de eficiência energética.

1.4 JUSTIFICATIVA

Não existe em Curitiba, geração distribuída através de sistemas fotovoltaicos, sejam conectados à rede elétrica ou isolados. O estudo de projetos

como o EV servirá de exemplo perante autoridades competentes do ramo de geração de energia, apresentando o funcionamento desse processo e suas vantagens. O EV também é pioneiro no Estado do Paraná e deverá ser enquadrado no processo de certificação de construção sustentável AQUA (Alta Qualidade Ambiental), da Fundação Vanzolini, da USP de São Paulo (UTFPR, 2011). Estudar a eficiência energética do EV é uma forma de divulgar para o mercado do Paraná, tanto consumidores quanto a concessionária de energia, a necessidade de se repensar as formas de utilização da energia. O emprego de novas tecnologias, que representem um compromisso ambiental mais satisfatório, é o que se pretende para garantir uma qualidade de vida maior às pessoas, e isso é resultado direto da forma como o ser humano trata o meio ambiente.

Essa avaliação do EV, do ponto de vista energético, ampliará as oportunidades de inserção no mercado dessas inovações tecnológicas. Esse pode ser o início de novos projetos, para o setor residencial e até industrial, que poderão promover uma mudança no perfil de Curitiba, com relação à emissão de gases poluentes, como o dióxido de carbono, além do consumo e geração de energia, visando atingir um patamar de sustentabilidade e eficiência mais alto.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O referencial teórico é uma etapa importante para a pesquisa. Serão buscados livros, monografias, artigos, reportagens, vídeos, revistas, além de sites referentes ao tema de pesquisa, a saber: desenvolvimento sustentável, geração fotovoltaica, geração eólica e tecnologia LED. Esse material será necessário para uma visão global do tema pesquisado, além da necessidade desse material para elaboração de raciocínios sistêmicos e conclusões, fundamentais antes, durante e após as medições.

A etapa de medições consiste, primeiramente, em estudar o sistema fotovoltaico isolado presente no EV, que se subdivide no arranjo de 12 e 24 V, e a carga alimentada a partir deste sistema, que é a moto bomba para recalque da água da chuva. Essa moto bomba é alimentada pelo arranjo de 12 V, que possui dois

módulos fotovoltaicos que totalizam 174 Wp. Será calculado o consumo de energia da moto bomba ao longo de um tempo de operação, a partir de medições de potência. Além disso, será calculada a energia fotovoltaica disponível pelo arranjo de 12 V, e este resultado possibilitará concluir sobre o dimensionamento do SFI e a possibilidade de aumento do número de cargas instaladas.

Serão feitas medições da iluminância em cada ambiente do EV, utilizando o período da noite, para que não haja interferência da luminosidade externa. A partir dessas medições, será simulado um estudo de iluminação fluorescente, e então, serão comparadas as demandas de potência para cada tecnologia de iluminação: à base de LEDs e fluorescente. Além disso, serão comparadas as eficiências destas tecnologias, considerando-se a iluminância produzida por unidade de Watt.

O SFCR possui 2,1 kWp de potência instalada e apresenta três medidores que avaliam os fluxos de energia existentes. Um medidor registra a energia gerada a partir dos módulos fotovoltaicos, o segundo medidor registra o quanto é consumido de energia no EV e, por fim, o último medidor mostra a diferença entre a energia consumida no EV e a energia fotovoltaica gerada. Esses dados serão apresentados na forma de gráficos e permitirão avaliar a autossuficiência do EV no suprimento de energia.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1 – Introdução com apresentação e delimitação do tema, problemas e premissas, objetivos principais, justificativa, metodologia, além de cronograma e referências.

Capítulo 2 – Desenvolvimento sustentável.

Capítulo 3 – Geração de energia a partir de radiação solar.

Capítulo 4 – Geração eólica.

Capítulo 5 – Diodo Emissor de Luz.

Capítulo 6 – Estudo dos sistemas de geração de energia do Escritório Verde.

Capítulo 7 – Estudo luminotécnico do Escritório Verde.

Capítulo 8 – Considerações finais.

Referências.

2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

2.1 PANORAMA GERAL

Em 1972, na Conferência de Estocolmo, já foi levantada a importância de se repensar à maneira como eram tratados os recursos energéticos (REIS; SILVEIRA, 2001, p. 18). Até então, desde o período pós-guerra, a relação do homem com o meio ambiente era extremamente predatória, voltada exclusivamente para atender o crescimento econômico das potências europeias, que haviam sofrido os impactos destruidores das duas grandes guerras. No hemisfério sul, por outro lado, os países em desenvolvimento buscavam desenvolver-se econômica e socialmente, da mesma forma que ocorreu com os países desenvolvidos muitos anos antes. Foi na década de 70, com a Conferência de Estocolmo, que se passou a discutir a importância de utilizar os recursos naturais de maneira mais inteligente, pois a vida das gerações futuras poderia correr sérios riscos caso se persistisse o modelo de crescimento econômico vigente. Tornou-se, assim, necessário considerar a possível escassez dos “bens” necessários à produção de energia.

Alguns anos mais tarde, em 1987, o relatório *Nosso Futuro Comum* foi redigido pela Comissão Mundial para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento.

Ficou claro que a noção de desenvolvimento sustentável está além da simples consideração da questão ambiental. Os problemas ambientais estão diretamente relacionados com os problemas da pobreza, como o atendimento às necessidades básicas de alimentação, saúde e moradia. É necessário rever os sistemas de produção quanto à escolha, gerenciamento e utilização dos recursos naturais, bem como quanto ao processo de inovação tecnológica. A solução para as questões ambientais têm de ser encontradas em um contexto amplo em que questões sociais, econômicas e políticas precisam também ser revistas (REIS; SILVEIRA, 2001, p. 18).

A UNCED (*United Nations Conference on Environment and Development*), também conhecida por ECO 92, foi uma das conferências da ONU, sediada no Rio de Janeiro em 1992, e manteve o enfoque do desenvolvimento sustentável como um problema mais amplo e que envolvia fatores políticos, econômicos, tecnológicos, ambientais e sociais. Resultaram-se da UNCED, que contou com a participação de mais de 25 mil pessoas, os seguintes documentos: a Agenda 21, a Convenção do

Clima, a Convenção da Biodiversidade, a Declaração do Rio e os Princípios sobre Florestas. Dentre esses documentos, possui singular importância a Convenção do Clima, por versar sobre medidas que visem à redução, até a neutralização das emissões de dióxido de carbono, por processos causados pelo homem.

Ao mesmo tempo em que a demanda por energia elétrica cresce de forma irrefreável, com o desenvolvimento tecnológico, os impactos ambientais são sentidos de forma acentuada. A matriz energética mundial possui cerca de 80% de representação dos combustíveis fósseis (REIS; SILVEIRA, 2001, p. 4). Esse cenário agrava a relação com o meio ambiente em que vivemos. Alguns dos efeitos das emissões consideráveis de dióxido de carbono são: a poluição do ar, às chuvas ácidas, o agravamento do efeito estufa e desertificação, a degradação marinha e costeira, além dos alagamentos. Países que se encontram em altitudes próximas ou equivalentes ao nível do mar, como a Holanda e Veneza, correm sérios riscos de serem extintos, por conta da elevação da temperatura global, que provocaria o descongelamento das geleiras da Antártida, elevando o nível dos oceanos.

A solução referente ao uso de combustíveis fósseis para geração de energia está na redução do dióxido de carbono emitido, o que é possível através do aprimoramento dos combustíveis fósseis, pela redução do teor de carbono (CPFL ENERGIA, 2011, ep. 4). Nesse paradigma diversas soluções já foram propostas. Faz-se necessário, porém, uma análise da eficácia dessas soluções frente à gravidade do problema das alterações climáticas e da procura por um nível maior de eficiência energética.

Relativamente à posição da Comissão Europeia em relação ao combate às alterações climáticas e à questão energética, considero que a proposta de redução das emissões de gases de efeito de estufa é tímida perante as evidências científicas que exigem compromissos mais fortes, e que continua a apostar em soluções erradas como o mercado de emissões e os agrocombustíveis (LOUÇA, 2009).

Uma solução é a tecnologia de sequestro de carbono. Tal procedimento teve seu primeiro projeto piloto em 2008, com a empresa estatal sueca Vattenfall. “Um tubo flexível de CO₂, na mini-usina de carvão "*Schwarze Pumpe*" em Spremberg, na Alemanha. A planta é um projeto piloto para CAC (Captura e armazenamento de carbono). As emissões de carbono provenientes do carvão são filtradas e enterradas (WISH, 2009).

O BEN (Balanço Energético Nacional), elaborado pelo EPE (Empresa de Pesquisa Energética) (EPE, 2012) mostrou diversos dados, entre eles estão às variações percentuais da oferta interna de energia e do PIB, baseando-se nos anos de 2010 e 2011. Enquanto a oferta interna de energia aumentou em 1,3%, o PIB aumentou 2,7%. Paralelamente, o consumo final de energia aumentou 2,4%. Essas taxas indicam um aumento da eficiência energética, pois a economia produziu mais consumindo menos energia.

A matriz elétrica brasileira para o ano de 2011 é apresentada na Figura 1. Conclui-se que da energia elétrica gerada em 2011, 81,7% foi de fontes hidráulicas, como grandes centrais hidrelétricas ou Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). A Figura 2 ilustra o quanto o Brasil está em situação vantajosa perante o restante dos países quando se fala em fontes renováveis para geração de energia elétrica. Cabe citar ainda que com relação à geração termelétrica, houve uma queda de 7,9% na participação do total de energia elétrica gerada, sendo que a biomassa lidera como fonte termelétrica, representando 36,8%. A biomassa considerada pode ser principalmente, bagaço de cana-de-açúcar, lixo, lenha e outras recuperações.

Quando se observa a Figura 3, nota-se o impacto ambiental, do ponto de vista de emissão de CO₂, que cada habitante provoca ao produzir e consumir energia ao longo do ano de 2009. Cada brasileiro emite, em média, nove vezes menos CO₂ que um americano e menos da metade que um chinês.

Foi de repercussão notável nas mídias a crise energética que o Brasil enfrentou no ano de 2001. As faltas de planejamento aliadas à escassez de chuva foram às principais causas desse problema. Além disso, sabe-se que 70% do potencial hidrelétrico brasileiro está localizado no rio Amazonas (Caminhos da Energia, 2011, ep. 6) que fica numa região que abriga um complexo ecossistema. Para construir uma usina hidrelétrica nesse ecossistema, diversos aspectos ambientais devem ser considerados, como por exemplo, possíveis alterações do fluxo migratório de peixes e animais, além da alteração do curso dos rios.

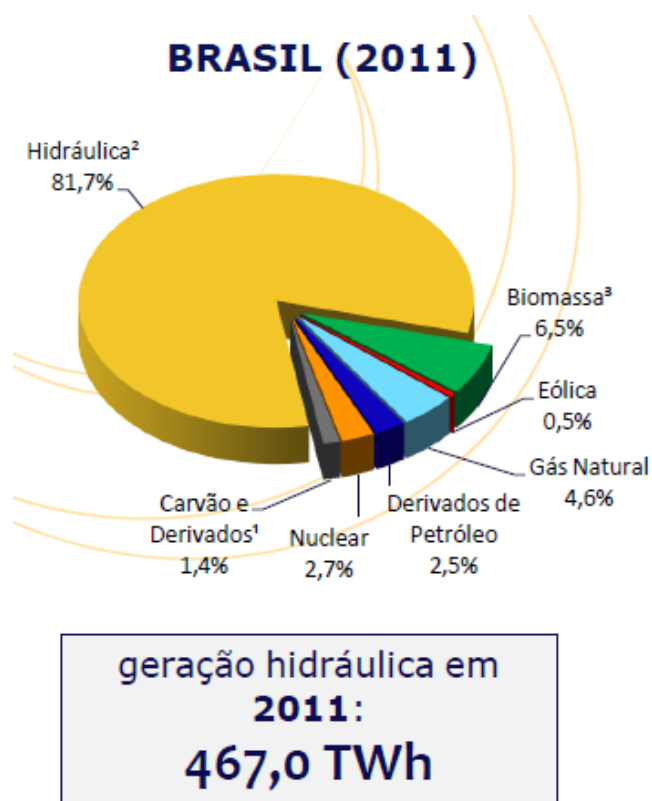


Figura 1 - Matriz elétrica brasileira

Fonte: EPE (2012).

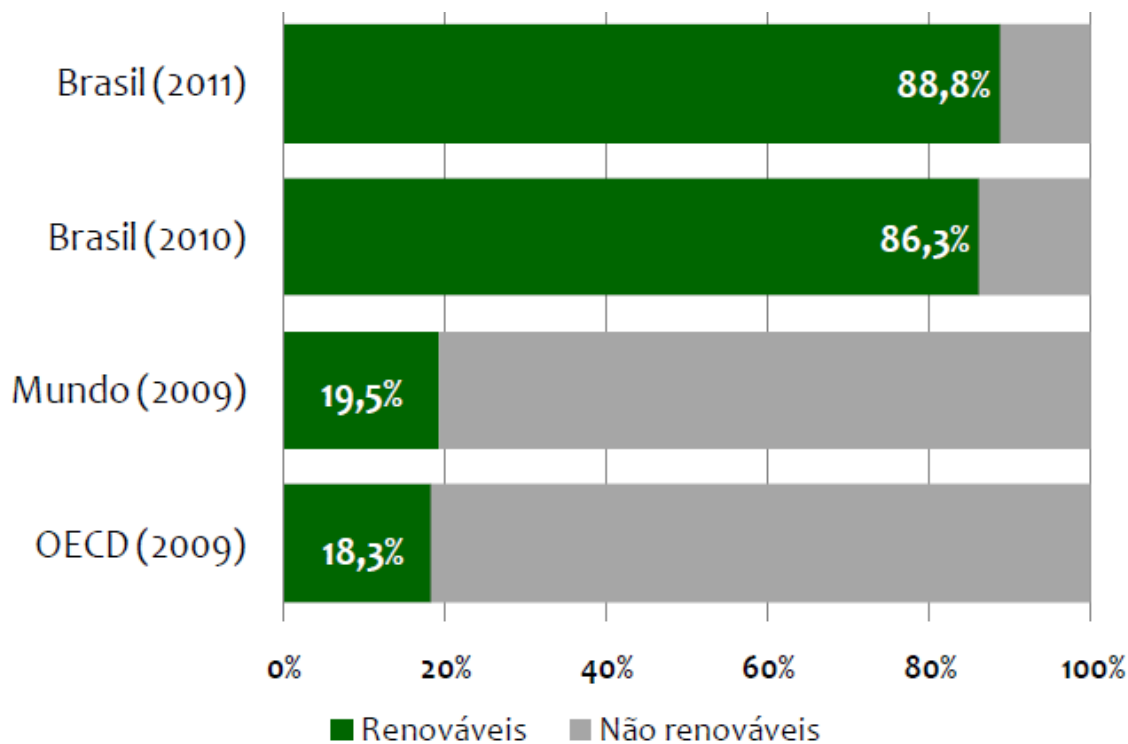


Figura 2 - Participação de renováveis na matriz elétrica

Fonte: EPE (2012).

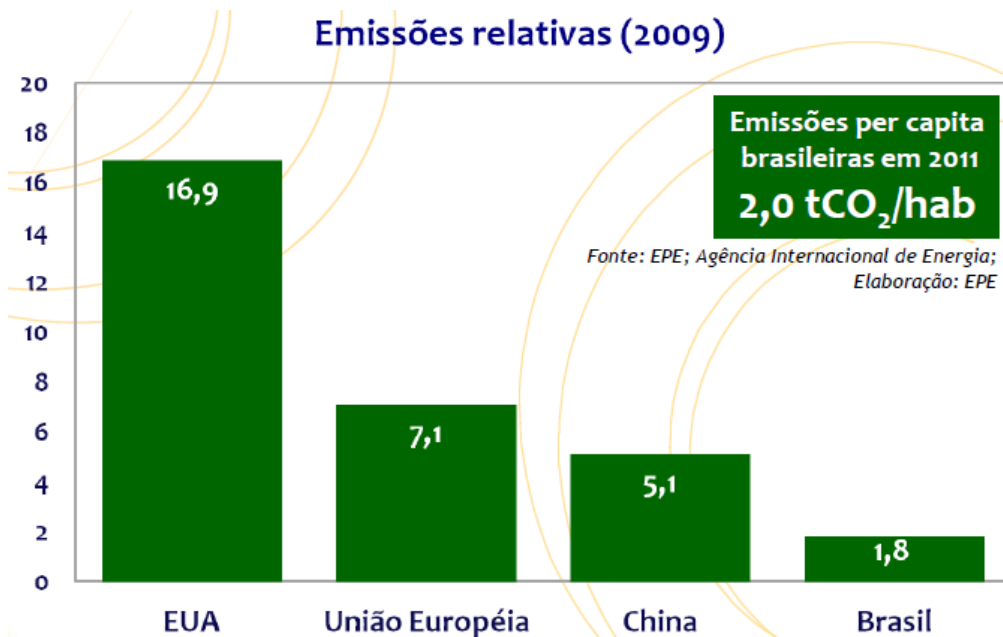


Figura 3 - Emissões de gás carbônico

Fonte: EPE (2012).

Por causa desse cenário o Brasil precisa diversificar sua matriz energética, pois, atualmente, é impossível garantir a confiabilidade no suprimento de energia, aliada ao cuidado com o meio ambiente, utilizando apenas um recurso energético.

O Brasil fechou uma parceria com a Alemanha que irá garantir empréstimos de até 52 milhões de euros, com juros reduzidos, para desenvolver projetos na área de fontes alternativas de energia, tais como: hidráulica, eólica, solar, geotérmica, oceânica, biomassa, resíduos sólidos e biocombustíveis (BLUE SOL, 2012a).

“O Brasil precisa continuar crescendo e diversificando suas fontes de energia. Esse esforço deve ocorrer por meio da busca de fontes renováveis sem impactos ambientais” (BLUE SOL, 2012b). A partir dessa premissa que o deputado Felipe Bornier apresentou na Câmara dos Deputados o projeto de lei nº2952/11 que institui o Programa de Incentivo ao Aproveitamento da Energia Solar, chamado Prosolar. O programa tem por meta atingir um nível de 1% na matriz energética, referente à geração fotovoltaica, para os próximos três anos e, de 3% em cinco anos. Reduzir impostos sobre os produtos que compõem um sistema fotovoltaico, como inversores e controladores de carga, bem como um planejamento de isenção

de tarifas para transmissão e distribuição de energia, para edificações com base em fonte solar, são alguns dos objetivos pautados no Prosolar.

2.2 PLANO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

2.2.1 Introdução

Em um documento chamado Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEE): Premissas e Diretrizes Básicas, publicado em 18 de outubro de 2011 pelo Ministério de Minas e Energia (MME), são apresentados alguns programas vigentes no Brasil, no âmbito da eficiência energética. Segundo o MME, 2011, a preocupação com a Eficiência Energética (EE) surgiu com a percepção da possível escassez do petróleo, de 1973-74 e 1979-81, que acabou elevando os preços desse recurso energético. Abriu-se, assim, o espaço para medidas voltadas à conservação e maior eficiência no uso dos seus derivados.

No Brasil já existem programas voltados para EE há pelo menos duas décadas. O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), o Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET) e o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Em 1975, alguns anos antes, já havia o Grupo de Estudos sobre Fontes Alternativas de Energia (GEFAE), que teve a colaboração do MME, e organizou um seminário sobre conservação de energia.

Em 24 de julho de 2000, foi promulgada a Lei nº 9.991, que regulamenta a obrigatoriedade de investimentos em programas de eficiência energética no uso final por parte das empresas brasileiras distribuidoras de energia elétrica. O Programa de Eficiência Energética das Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica (PEE), já contabilizou R\$2 bilhões em investimentos realizados ou em execução (ELETROBRAS; PROCEL, 2012).

O que se pretende é uma proposta de atuação integrada e coordenada das várias instituições e organismos que se relacionam com a temática da eficiência energética, considerando que:

- a Lei nº 9.478, de 06.08.97, no seu artigo 1º, inciso IV, estabelece que um dos princípios e objetivos da Política Energética Nacional é "proteger o meio ambiente e promover a conservação de energia";
- o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), no exercício de suas atribuições, entre elas aquela estabelecida no artigo 2º, inciso I, da citada Lei, "promover o aproveitamento racional dos recursos energéticos do País, em conformidade com os princípios enumerados no capítulo anterior com o disposto na legislação aplicável", obterá suporte dos demais órgãos responsáveis por regular o setor energético;
- à Agência Nacional de Petróleo (ANP), segundo o artigo 8 da mesma Lei, cabe "promover a regulação, a contratação e a fiscalização das atividades econômicas integrantes da indústria de petróleo e gás natural" e, conforme o inciso IX, "fazer cumprir as boas práticas de conservação e uso racional do petróleo, dos derivados e do gás natural e de preservação do meio ambiente;
- a Lei nº 9.427, de 26.12.96, no seu artigo 3º, estabelece que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) possui como incumbência, entre outras, "estimular o aumento da qualidade, produtividade, preservação do meio ambiente e conservação", como prescrito na Lei nº 8.987, de 13.02.95, no seu artigo 29, inciso X;
- a ANEEL apresenta como competências, também, "incentivar o combate ao desperdício de energia no que diz respeito a todas as formas de produção, transmissão, distribuição, comercialização e uso da energia elétrica", "articular-se com outros órgãos reguladores do setor energético e da administração federal sobre matérias de interesse comum" e "estimular e participar das atividades de pesquisa e desenvolvimento tecnológico necessário ao setor de energia elétrica", conforme anexo I, do Decreto nº 2.335, de 06.10.97, no seu artigo 4, incisos IX, XX e XXIII, respectivamente.

2.2.2 PROCEL, CONPET e PBE

O PROCEL foi fundado em dezembro de 1985, sendo coordenado pelo MME e operacionalizado pela Eletrobrás, tem por objetivo proporcionar a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica, para que se eliminem os desperdícios e se reduzam os custos e os investimentos setoriais.

Investiu mais de R\$1 bilhão desde sua implantação, com recursos oriundos da própria Eletrobrás e da RGR (Reserva Global de Reversão). Com a redução no consumo e demanda na ponta, 32,9 TWh e 9.538 MW respectivamente, durante 1986 até 2008, investimentos da ordem de R\$22,8 bilhões foram evitados. As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam os principais resultados energéticos, de ações e financeiros da Eletrobras Procel em 2011. Uma observação: no resultado “Usina Equivalente” foi adotado fator de capacidade médio típico de 56% para usinas hidrelétricas, além de perdas de 15% na geração e transmissão.

Tabela 1 - Principais resultados das ações da Eletrobras Procel em 2011

| Resultado | Total |
|---|--------------|
| Energia Economizada (bilhões de kWh) | 6,696 |
| Redução de Demanda na Ponta (MW) | 2,619 |
| Usina Equivalente (MW) | 1,606 |
| Emissão de CO ₂ Equivalente Evitada (mil t CO ₂) | 196 |

Fonte: ELETROBRAS; PROCEL (2012).

Tabela 2 - Indicadores de resultados das ações da Eletrobras Procel em 2011

| Indicador | Total |
|--|--------------|
| Economia em relação ao consumo total de energia elétrica no Brasil (%) | 1,56 |
| Economia em relação ao consumo residencial de energia elétrica no Brasil (%) | 5,97 |
| Número de residências que poderiam ser atendidas com a economia de energia, durante um ano (milhões) | 3,6 |

Fonte: ELETROBRAS; PROCEL (2012).

Tabela 3 - Recursos financeiros aplicados no Procel em 2011

| Recursos financeiros | | Valor (Milhões R\$) |
|-----------------------------|------------------|----------------------------|
| Eletrobras | Investimento EP | 3,2 |
| | Investimento FDT | 5,32 |
| | Custeio | 18,58 |
| | Subtotal | 27,10 |
| RGR | Investimento | 68,46 |
| Total | | 95,56 |

Fonte: ELETROBRAS; PROCEL (2012).

O CONPET foi fundado em 18 de julho de 1991 e visa promover o uso eficiente de combustíveis no transporte, nas residências, no comércio, na indústria e na agropecuária, contribuindo para a redução no consumo de combustível e a redução na emissão de poluição e de gases associados ao efeito estufa.

Vinculado ao MME e coordenado por órgãos do Governo Federal e da iniciativa privada, o CONPET é implementado pela Petrobras, que é responsável por

fornecer recursos financeiros, administrativos e técnicos, bem como pelas ações necessárias ao Programa.

Alguns resultados de ambos os programas são: a ENCE (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia), o selo PROCEL de Economia de Energia, o selo CONPET de Eficiência Energética e o Prêmio Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Estas medidas contribuem para a divulgação dos programas. As vantagens desses programas são claras, pois permitem: o atendimento da demanda crescente sem que a oferta seja ampliada na mesma proporção, em decorrência do aumento da eficiência energética; o aumento da eficiência econômica; a maior segurança no abastecimento de energia; a redução dos impactos ambientais. A Figura 4 apresenta resultados acumulados do CONPET, para os anos de 2006 até 2010.

| Total | |
|--|--------|
| Investimentos Totais Realizados (R\$ Milhão) | 50 |
| Litros de diesel economizados (milhões) | 1030,2 |
| CO ₂ evitados (mil toneladas) | 2767 |
| Particulados não emitidos (mil toneladas) | 95,7 |

Figura 4 - Exemplos de alguns resultados acumulados do CONPET

Fonte: MME (2012).

O PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem) foi oficialmente criado em 1984, através de protocolo firmado entre o Ministério da Indústria e Comércio e a ABINEE, tendo como interveniente o MME. Tem por objetivo fornecer informações relacionadas ao consumo de energia dos equipamentos eletrodomésticos, para que os consumidores possam escolher comprar os produtos com maior eficiência energética.

O PBE ganhou grande importância após a criação da lei nº 10.295/2001, conhecida como a "Lei de Eficiência Energética", que dispôs sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional da Energia, e estabeleceu níveis máximos de consumo ou mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia comercializados no país. O Decreto nº 4.059/2001 regulamentou a referida Lei e criou o CGIEE (Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética), com a função, entre outras, de elaborar um programa de metas com indicação da evolução dos níveis almejados para os equipamentos regulamentados. Este Decreto definiu, também, que o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial) seria o órgão responsável pela regulamentação, condução e fiscalização dos Programas de Avaliação da Conformidade relacionados com eficiência energética.

2.2.3 Indicadores de desenvolvimento sustentável

Para monitorar os problemas sociais oriundos da desigualdade da distribuição de renda, durante os anos 60, deu-se início ao desenvolvimento de sistemas de indicadores sociais, envolvendo aspectos como saúde, educação, equidade, trabalho e rendimento, perdendo o PIB sua exclusividade (SCANDAR NETO, 2006). As discussões passaram a ser focadas não no que ocorria nos países mais ricos, mas naqueles que apresentassem melhor qualidade de vida.

Indicadores são ferramentas constituídas por uma ou mais variáveis que, associadas através de diversas formas, revelam significados mais amplos sobre os fenômenos a que se referem. Indicadores de desenvolvimento sustentável são instrumentos essenciais para guiar a ação e subsidiar o acompanhamento e a avaliação do progresso alcançado rumo ao desenvolvimento sustentável. Devem ser vistos como um meio para se atingir o desenvolvimento sustentável e não como um fim em si mesmos. Valem mais pelo que apontam do que pelo seu valor absoluto e são mais úteis quando analisados em seu conjunto do que o exame individual de cada indicador (IBGE, 2012).

A tentativa de se mensurar essa gestão dos recursos naturais, levando em conta os aspectos políticos, econômicos, ambientais e sociais de um país, culminou com a criação de 62 indicadores, que procuram traduzir em números o grau de desenvolvimento para a sustentabilidade. Um documento elaborado pela CSD

(Comissão de desenvolvimento sustentável) foi criado na Assembleia Geral da ONU, em 1992, visando assegurar a continuidade da UNCED, ou chamada por ECO92. O documento denominado *Indicators of sustainable development: framework and methodologies*, apresenta um quadro comparativo de indicadores sociais divididos em temas e subtemas a fim de orientar a utilização desses indicadores aos países interessados, conforme Tabela 4.

Os indicadores podem fornecer orientações cruciais para a tomada de decisões em uma variedade de maneiras. Eles podem traduzir o conhecimento da ciência física e social em unidades gerenciáveis de informações que, segundo Ribeiro (2004), podem facilitar o processo de tomada de decisões governamentais em relação ao desenvolvimento sustentável.

Tabela 4 - Temas sugeridos como prioridades nacionais pela CSD

| Social | Ambiental |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Educação | Qualidade da água |
| Emprego | Agricultura/suprimento de alimentos |
| Saúde/saneamento básico | Urbanização |
| Habitação | Zona costeira |
| Bem-estar e qualidade de vida | Pescas |
| Patrimônio cultural | Biodiversidade/biotecnologia |
| População | Manejo florestal sustentável |
| Valores sociais e éticos | Poluição do ar e camada de ozônio |
| Papel da mulher | Turismo sustentável |
| Acesso a terra e recursos | Capacidade de carga restrita |
| Estrutura da comunidade | Mudança no uso da terra |
| Economia | Industrial |
| Dependência econômica | Decisões integradas |
| Energia | Capacidade de construção |
| Padrões de produção e consumo | Ciência e tecnologia |
| Tratamento do lixo | Consciência pública e informação |
| Transporte | Governança/papel da sociedade civil |
| Desenvolvimento e estrutura econômica | Prevenção e controle de desastres |
| Comércio | Participação pública |
| Produtividade | |

Fonte: *Indicators of sustainable development: framework and methodologies* (2001), adaptado.

O indicador mais conhecido, o PIB, considera apenas as movimentações financeiras e de ordem econômica, não abrangendo o aspecto social e ambiental (REIS; SILVEIRA, 2001, p. 23). Como se sabe, o bem-estar social abrange muito mais do que valores econômicos, mas também fatores como saúde, segurança, qualidade de vida e qualidade ambiental, portanto, notou-se a necessidade de se estabelecer novos indicadores, a saber (REIS; SILVEIRA, 2001, p. 25):

- o *ISEW (Index of Sustainable Economic Welfare)*, ou seja, Índice de Bem-estar Econômico Sustentável, desenvolvido por Daly e Cobb (1989), que leva em conta fatores sociais e ambientais no processo de crescimento econômico. Estudos sobre países desenvolvidos, utilizando o enfoque desse indicador, mostraram situações em que ocorre o crescimento contínuo do PIB, embora o ISEW permaneça estabilizado ou até, em alguns casos, decresça;
- o chamado MIPS (*Material Intensity per Unit of Service Delivered*), criado por Schmidt-Bleek (1999), traduzindo, Intensidade Material por Unidade de Serviço Prestado. Esse indicador relaciona o uso de recursos e o impacto ambiental causado. O que os estudos realizados mostraram foi a necessidade de uma desmaterialização da economia num fator de 10 ou mais a fim de se reduzir os fluxos materiais antropogênicos em 50%;
- a Pegada Ecológica mostra a área de terra necessária para dar suporte ao consumo de uma determinada sociedade (REIS; SILVEIRA, 2001, p. 25);
- existem, ainda, os quatro princípios socioecológicos de sustentabilidade, cuja definição é dada por Holmber (1995), que enfatiza a conversão de recursos físicos em sistemas sociais, bem como a melhoria dos processos de conversão e distribuição dos recursos na sociedade.

2.3 SUSTENTABILIDADE: CENÁRIO BRASILEIRO

2.3.1 RIO+20: objetivos e resultados esperados

Em documento redigido por Belinky, Telles e Born, os objetivos da RIO+20 (Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável), sediada no Rio de Janeiro, entre as datas de 13 e 22 de junho, foram:

- assegurar um comprometimento político renovado para o desenvolvimento sustentável;
- avaliar o progresso feito até o momento e as lacunas que ainda existem na implementação dos resultados dos principais encontros sobre desenvolvimento sustentável;
- abordar os desafios novos e emergentes.

Em síntese, a RIO+20, em seu conjunto, veio promover uma ampla discussão sobre o estado do mundo e os rumos atuais da civilização, procurando consolidar os objetivos dos diferentes atores sociais e definir diretrizes tão consensuais quanto possível para dar efetividade ao objetivo comum de se avançar, realmente, na construção de uma sociedade que alie o aspecto econômico, ambiental e social de forma justa, satisfatória e harmônica.

A conferência, do ponto de vista de resultados, não gerou um documento que envolvesse detalhes técnicos e de implementação, além disso, o documento não tem o seu cumprimento obrigatório pelos países que o assinam.

O documento gerado, embora não possua caráter legalmente vinculante, trouxe uma gama de compromissos políticos relacionados a protocolos e convenções já vigentes ou a serem implantados, seja pela ONU ou pelos países signatários.

2.3.2 Dados de indicadores de desenvolvimento sustentável do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

A construção de indicadores de desenvolvimento sustentável no Brasil integra-se ao conjunto de esforços internacionais para concretização das ideias e princípios formulados na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, no que diz respeito à relação entre meio ambiente, sociedade, desenvolvimento e informações para a tomada de decisões.

O trabalho de construção de IDS (Dados de indicadores de desenvolvimento sustentável) no Brasil ficou sob a responsabilidade do órgão oficial de estatística do governo, o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

O IBGE lançou durante a RIO+20 os indicadores que abrangem quatro aspectos: econômico, político, ambiental e social. Com relação aos indicadores de dimensão econômica, cabe citar os que refletem o impacto ambiental no consumo de recursos naturais, como a energia. A Figura 5 ilustra a participação das fontes renováveis na matriz energética no Brasil. As fontes renováveis representam 44,1% e dividem-se em: 15,7% biomassa de cana; 14,7% hidráulica; 9,7% lenha e carvão vegetal e 4,7% lixo e outras renováveis. Os 55,9% de fontes não renováveis são: 38,6% petróleo e derivados; 10,1% gás natural; 5,6% carvão mineral e 1,5 % urânio.

Conforme a Figura 6, o Brasil possui reservas suficientes de petróleo e gás natural, pois para o ano de 2010, a ordem de grandeza registrada foi de 19 anos para o petróleo e 18 anos para o gás natural. O total de petróleo disponível sofreu variações no decorrer do tempo, destacando-se o aumento ocorrido com as descobertas na camada do pré-sal da costa brasileira. O gás natural, por outro lado, sofreu decréscimos em razão da exploração das reservas descobertas na década de 1980. A situação do Brasil em relação ao etanol pode ser observada na Figura 7, em que é mostrada a evolução da produção de etanol anidro e hidratado, entre os anos de 2001 e 2010.

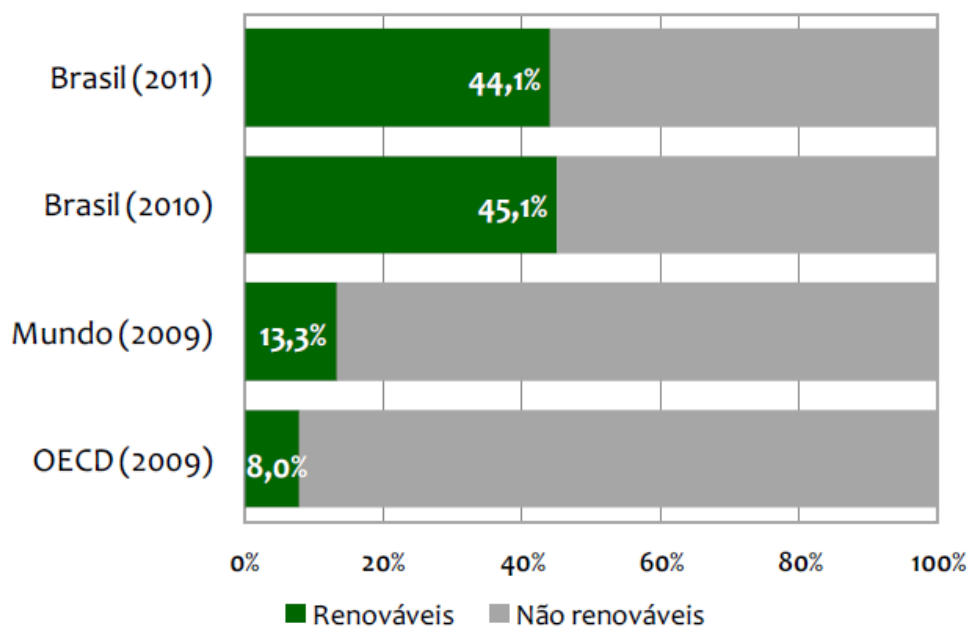


Figura 5 - Fontes renováveis na matriz energética brasileira

Fonte: EPE (2012).

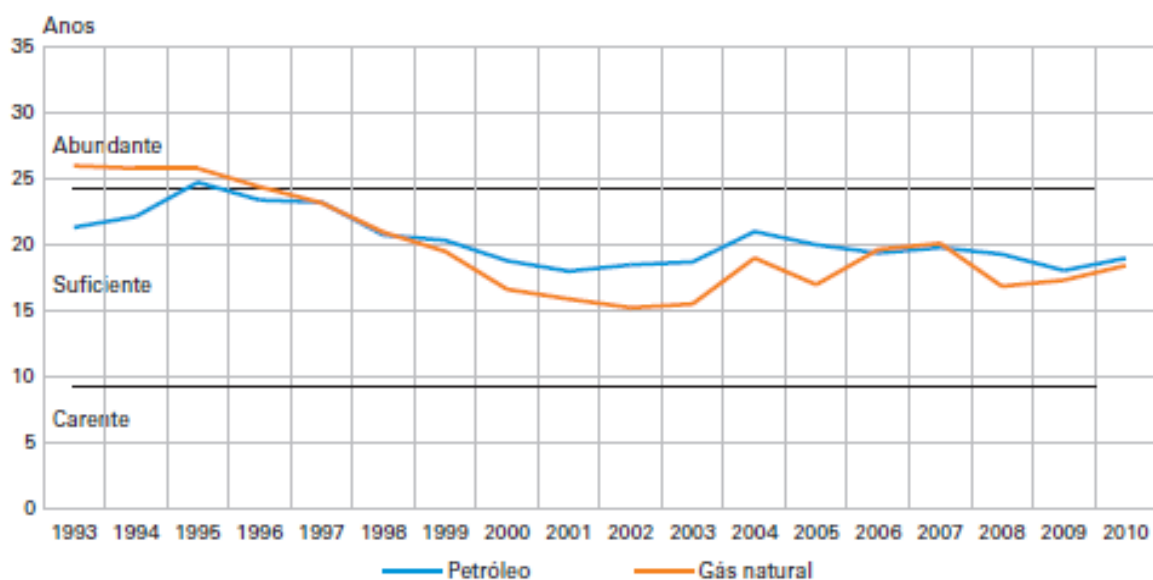


Figura 6 - Vida útil das reservas de petróleo e gás natural

Fonte: ANP (2011).

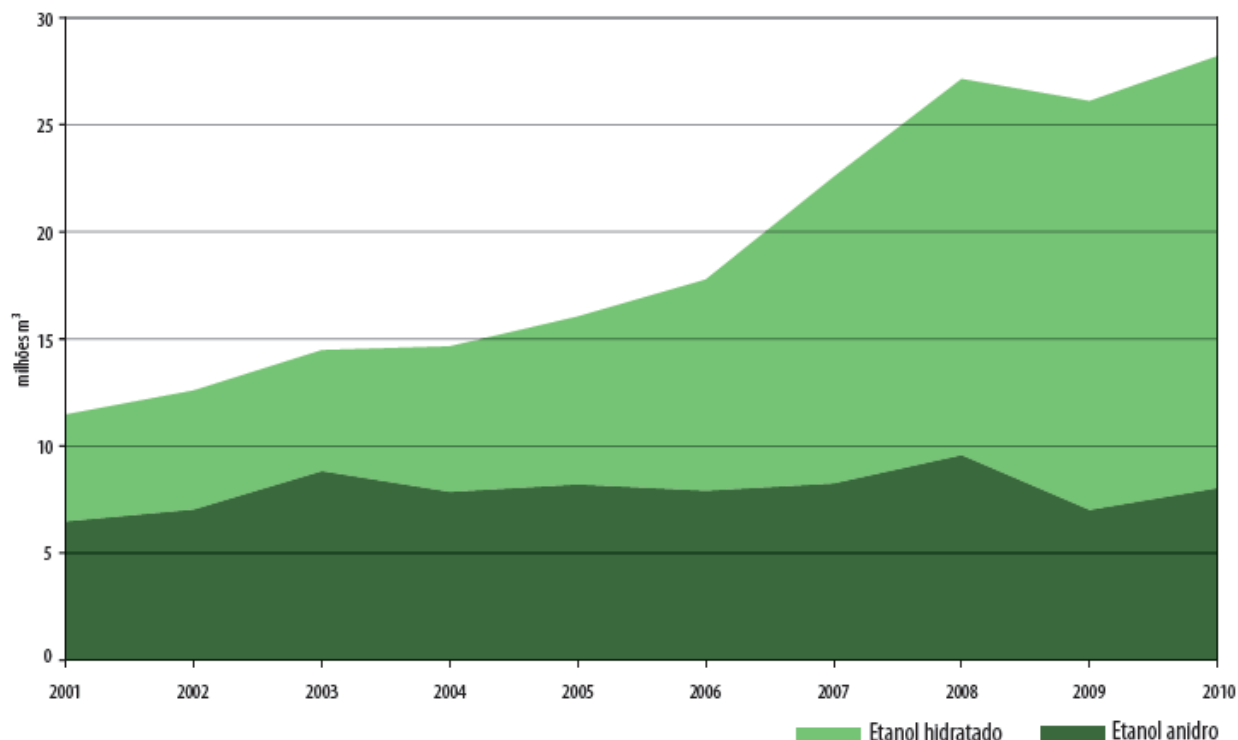


Figura 7 - Evolução da produção nacional de etanol anidro e hidratado

Fonte: ANP (2011).

2.3.3 Conclusões da RIO+20

Dentre os inúmeros acordos em âmbito governamental, a RIO+20 definiu um compromisso assumido por prefeitos das maiores cidades, que compõem a Cúpula dos Prefeitos, de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 12% até 2016, e em 1,3 bilhão de toneladas até 2030. Cabe salientar que a Cúpula dos Prefeitos reúne 59 das maiores cidades do mundo.

A criação do primeiro Banco de Investimentos Verdes foi anunciada pelo vice primeiro Ministro do Reino Unido, Nick Clegg, e representa um compromisso assumido durante a RIO+20. Iniciará com 3 bilhões de libras e espera-se que até 2015 capte no mercado cerca de 15 bilhões de libras. O propósito do banco será de fornecer financiamentos para empreendimentos com baixa emissão de carbono a partir deste ano. Algumas áreas visadas, inicialmente, são: energia eólica (parques eólicos em alto mar), a destinação e o tratamento correto de resíduos e a eficiência energética, tanto empresarial quanto residencial (RIO20, 2012).

2.3.4 Soluções para uma maior sustentabilidade

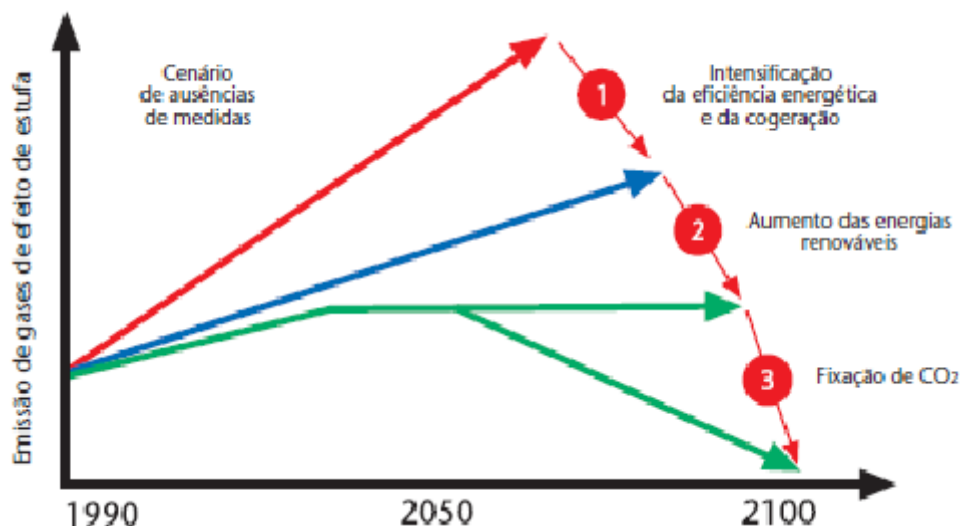


Figura 8 - Estratégias para o desenvolvimento sustentável

Fonte: Universidade de Coimbra (2005, p. 11).

A Figura 8 mostra que a maximização da eficiência energética e da cogeração, aliada ao maior uso das energias renováveis, bem como medidas de fixação de dióxido de carbono, são as soluções complementares que prometem uma redução da emissão dos gases que contribuem para o agravamento do efeito estufa. Quanto à eficiência energética, percebem-se vantagens, consequências e algumas restrições, citadas abaixo (UNIVERSIDADE DE COIMBRA, 2005, p. 10):

- vantagens associadas ao emprego da eficiência energética: o conceito básico de eficiência energética consiste na manutenção ou até ampliação, da produção de bens, serviços e conforto, através de tecnologias que reduzam o consumo de energia. A partir da redução do consumo de energia, têm-se a redução da emissão de poluentes associados ao processo de geração de energia. O investimento inicial mais elevado é compensado, ao longo de certo tempo, pois equipamentos mais eficientes possuem vida útil maior, além de reduzirem os gastos com manutenção e consumo de energia;
- consequências quanto ao investimento em eficiência energética:
 - reforço da competitividade entre as empresas;

- redução do consumo energético do país;
 - redução da dependência energética;
 - redução das emissões de gases poluentes, incluindo os que agravam o efeito estufa, como óxidos de nitrogênio, gás carbônico e os CFCs (Cloro Flúor Carbonetos);
 - além disso, os resultados de ordem não energética são percebidos de maneira significativa pelo consumidor, a saber: aumento do conforto e segurança; redução do ruído; aumento da produtividade do trabalho; melhoria do controle de processos; economia de água; redução dos resíduos; aumento do emprego associado aos equipamentos eficientes, desde a fabricação e instalação até a manutenção.
- restrições de mercado: estudos mostram que investimentos em eficiência energética são mais baratos do que a expansão da oferta de energia. No entanto, ao deparar-se com novas tecnologias, existem fatores que oferecem resistência a sua disseminação. Pode-se citar, por exemplo, o desconhecimento por parte dos consumidores, quanto ao uso e funcionamento de novas tecnologias. A sociedade também, talvez por não saber ao certo o que esperar dessas novas soluções energéticas, apresenta aversões quanto ao risco inerente que existe em novos métodos. Outros aspectos são: a falta de capital para realizar investimentos e, também, as limitações no acesso a créditos em condições tão vantajosas como as obtidas pelas empresas responsáveis pela oferta de energia; ausência de incentivos fiscais, como redução de impostos ou créditos para investimentos em fontes alternativas de energia; o retorno do investimento inicial costuma ocorrer em longo prazo, por vezes superior a dois ou três anos, devido aos preços mais elevados das tecnologias mais eficientes.

2.4 A GERAÇÃO DESCENTRALIZADA DE ENERGIA

2.4.1 Geração distribuída

No Brasil cerca de 82 % da oferta total de energia elétrica são asseguradas por grandes centrais hidrelétricas distantes dos grandes centros de consumo (EPE, 2012). Tal fato mostra a necessidade de implantação de novas alternativas de geração que levem em conta fatores como distribuição geográfica da população, confiabilidade e flexibilidade de operação, licenciamento ambiental, entre outros.

Assim, a geração em menor escala, associada ao consumidor surgiu como uma alternativa confiável e rentável. Adicionando tais características ao aumento da eficiência energética e a tentativa de minimizar os impactos ambientais decorrentes de seu processo, visualiza-se na geração distribuída uma forma de amenizar problemas resultantes da geração de energia em grande escala (Ackermann, 2001).

Segundo Bo e Ka (2011), o aumento da implantação de GD ocorre, parcialmente, em razão das perdas das economias de escala, ou seja, aqueles modelos econômicos em que se procura maximizar o uso dos fatores produtivos, ao custo mais baixo possível. A GD possui as principais vantagens:

- uso de fontes de energia renováveis, reduzindo os impactos ambientais da geração convencional, por exemplo das termelétricas, que acarretam em emissão de gases poluentes;
- nas redes de distribuição, a GD pode suprir os aumentos parciais das cargas, além de fornecer energia para os horários de ponta do consumo;
- pode aumentar a confiabilidade do suprimento nas redes de distribuição;
- pode aumentar a eficiência energética e reduzir as perdas nas linhas de transmissão e redes de distribuição, além da cogeração associada a GD, que aumenta o nível da eficiência de utilização da energia primária.

As dificuldades, no entanto, estão nos altos custos e problemas quanto ao controle e uso de GD. De acordo com IEEE SCC21 (*IEEE Standards Coordinating*

Committee 21), na norma IEEE 1547/D08 - *Draft Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electrical Power System*, são definidos padrões para a conexão de GD: quando há alguma falha na rede elétrica, a GD deve ser desligada imediatamente, e isso limita muito a eficiência dos recursos distribuídos.

Foi criado o conceito de micro-rede, em 2001, por Robert H. Lasseter, que consiste em um sistema que abrange a geração de energia, o acúmulo dessa energia, a transformação da energia, além da monitoração e controle da instalação e da carga. Trata-se de um sistema isolado, capaz de executar as operações de controle, proteção e gerenciamento da energia. Pode operar em paralelo com o sistema centralizado de geração ou, como na ocorrência de alguma falta, a micro-rede pode operar isolada do sistema da concessionária de energia. Para o consumidor (lado da carga), existe aumento da confiabilidade, aumento da eficiência energética, redução de impactos ambientais, além de melhora na qualidade da energia, devido à redução de problemas como quedas de tensão ou sobretensões.

Na Figura 9 pode ser observada uma micro-rede que combina geração fotovoltaica e eólica no mesmo sistema. Esse sistema possui armazenamento de energia por banco de baterias, além de uma unidade de monitoramento e controle, que regula a transferência de energia entre os sistemas abordados. Os equipamentos presentes nessa micro-rede serão abordados com mais detalhes nos capítulos 3 e 4.

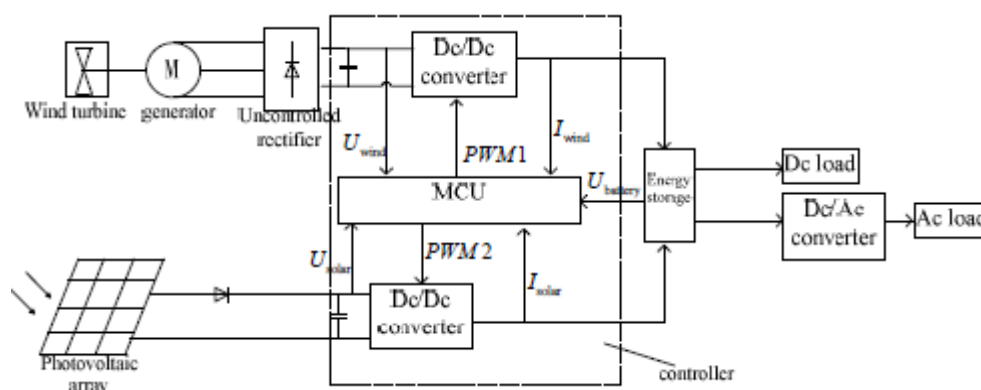


Figura 9 - Configuração de uma micro-rede

Fonte: BO, KA (2011).

2.4.1.1 Um estudo de eficiência energética

Em um estudo sobre a redução de perdas nas linhas devido à conexão de GD, em paralelo com o sistema, realizado por Dang, Yu, Dang e Han (2011), foi utilizada a nomenclatura abaixo.

G : distância da fonte até o local da GD, km;

I_G : corrente de saída da GD por fase, A/φ;

I_L : corrente de carga por fase, A/φ;

I_S : corrente da fonte por fase, A/φ;

L : comprimento total da linha de distribuição, km;

$LOSS_b$: perda total na linha antes da inclusão da GD, W;

$LOSS_{agl}$: perda na linha a partir da GD até a carga, W;

$LOSS_{asg}$: perda na linha a partir da fonte até a GD, W;

$Loss_{at}$: perda total na linha após a inclusão da GD, W;

P_G : potência ativa da GD, W;

P_L : potência ativa da carga, W;

PF_G : fator de potência da GD;

PF_L : fator de potência da carga;

Q : potência reativa da GD, var;

Q_L : potência reativa da carga, var;

r : resistência da linha por fase por unidade de comprimento, Ω/ km;

R : resistência total da linha por fase, Ω/ km;

Y : fração da potência ativa da carga suprida pela GD;

Na Figura 10 é mostrada a modelagem do sistema sem a GD, enquanto a Figura 11 mostra a inserção de GD no ponto considerado.

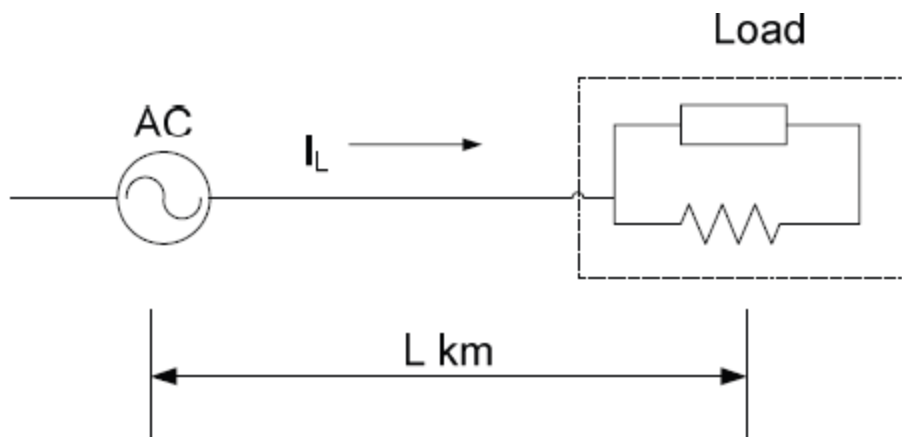


Figura 10 - Sistema de distribuição radial sem GD

Fonte: DANG *et al.* (2011).

De circuitos elétricos, sabe-se que a potência absorvida pela carga é dada pela equação 1.

$$S = P_L + jQ_L \quad (1)$$

Dessa forma, a corrente absorvida pela carga será conforme a equação 2.

$$I_L = \frac{(P_L + jQ_L)}{3V_p} \quad (2)$$

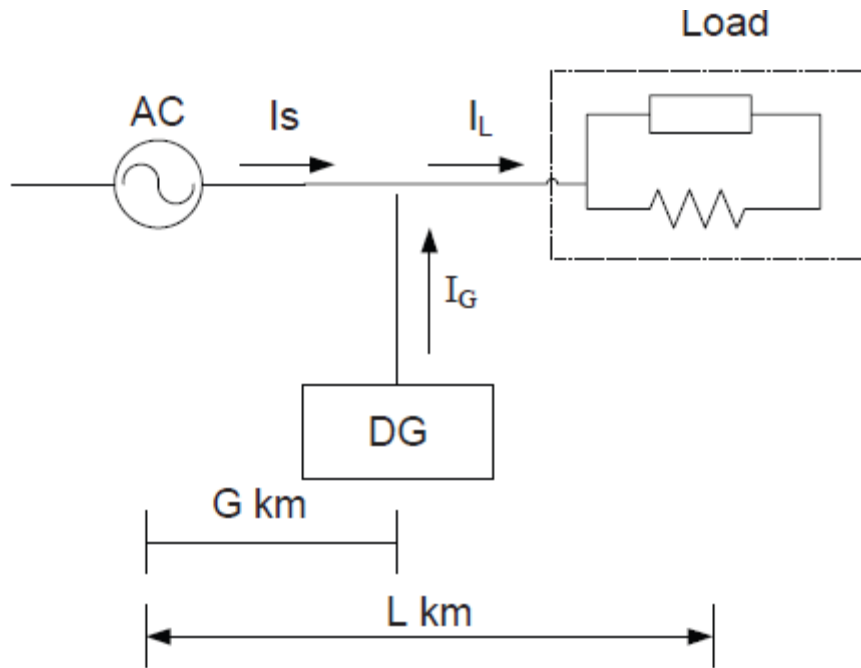


Figura 11 - Sistema de distribuição radial com inserção de GD no ponto considerado

Fonte: DANG *et al.* (2011).

- análise de redução de perda na linha:

A magnitude da perda na linha está relacionada com a corrente que circula por ela e a resistência elétrica da linha. Com a GD, reduz-se a amplitude da corrente que flui através da linha, conseqüentemente, reduzem-se as perdas na linha.

- perda sem GD

Elevando a equação 2 ao quadrado e multiplicando pela resistência elétrica da linha, tem-se a equação 3.

$$Loss_B = \frac{rL(P_L^2 + Q_L^2)}{3V_P^2} \quad (3)$$

- perda com a inclusão de GD

Obs.: Assume-se a queda de tensão na linha como sendo desprezível.

A potência suprida pela GD é conforme a equação 4.

$$S = P_G + jQ_G \quad (4)$$

Logo a corrente de saída da GD é como a equação 5.

$$I_G = \frac{(P_G - jQ_G)}{3V_P} \quad (5)$$

O cálculo da perda na linha é dividido, então, em duas partes, primeiro a partir da fonte até o ponto em que a GD está instalada. Pela figura 11, a corrente neste trecho é como exposto na equação 6:

$$I_S = I_L - I_G \quad (6)$$

A expressão da perda na linha para este trecho é como a equação 7:

$$Loss_{ASG} = \frac{rG(P_L^2 + Q_L^2 + P_G^2 + Q_G^2 - 2P_L P_G - 2Q_L Q_G)}{3V_P^2} \quad (7)$$

Em seguida, calcula-se a partir da GD até o ponto de conexão da carga;

A expressão para perdas neste trecho é como a equação 8:

$$Loss_B = \frac{r(L-G)(P_L^2 + Q_L^2)}{3V_P^2} \quad (8)$$

Somando as equações 7 e 8, têm-se as perdas totais na linha com a inserção de GD, como a equação 9:

$$Loss_{AT} = \frac{rL(P_L^2 + Q_L^2 + P_G^2 + Q_G^2 - 2P_L P_G - 2Q_L Q_G)}{3V_P^2} \frac{G}{L} \quad (9)$$

A redução das perdas na linha pela inserção de GD (vide figura 3) é dada pela diferença entre as equações 3 e 9. O resultado é mostrado na equação 10:

$$LR = Loss_B - Loss_{AT} = \frac{rG(2P_L P_G + 2Q_L Q_G - P_G^2 - Q_G^2)}{3V_P^2} \quad (10)$$

A redução de perdas por unidade é definida na equação 11:

$$PULR = \frac{LR}{Loss_B} = \frac{G}{(P_L^2 + Q_L^2)L} (2P_L P_G + 2Q_L Q_G - P_G^2 - Q_G^2) \quad (11)$$

- resultados

As influências de diferentes capacidades instaladas de GD e variados pontos de conexão foram simulados computacionalmente. Os fatores de potência da carga e da GD foram fixados em 0,85 em atraso e o ponto de conexão da GD com o sistema encontra-se no ponto médio do ramal alimentador. O valor de saída para as GD é variado ao longo de sete valores, de 0,2 até 1,4 pu, enquanto a carga é mantida constante em 2,0 pu. Na Figura 12 foi plotada a grandeza que expressa a redução percentual das perdas na linha no eixo y, enquanto no eixo x foram plotados os diferentes valores de capacidade da GD, em pu.

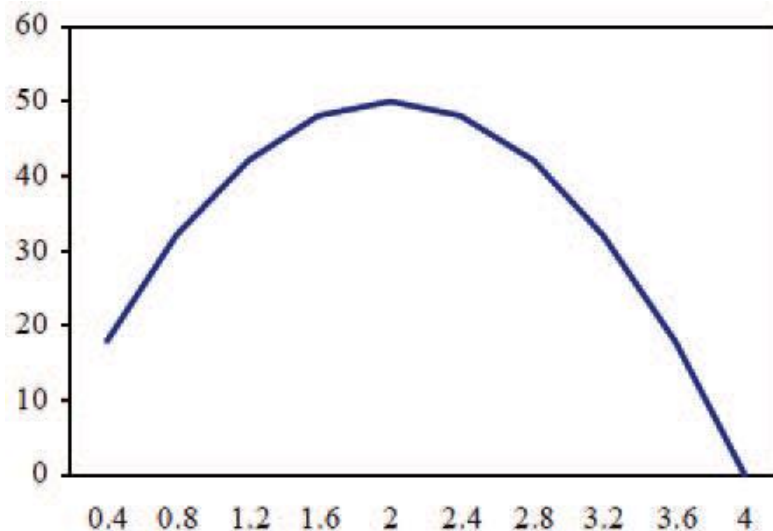


Figura 12 - Potência da GD x redução de perdas na linha.

Fonte: DANG *et al.* (2011).

A Figura 13 mostra uma plotagem semelhante a da Figura 12, porém para diferentes pontos de conexão da GD. A posição 1 corresponde a 20% distante da fonte, a 2 corresponde a 40%, a 3 corresponde a 60%, a 4 corresponde a 80% e a 5 corresponde a 100%.

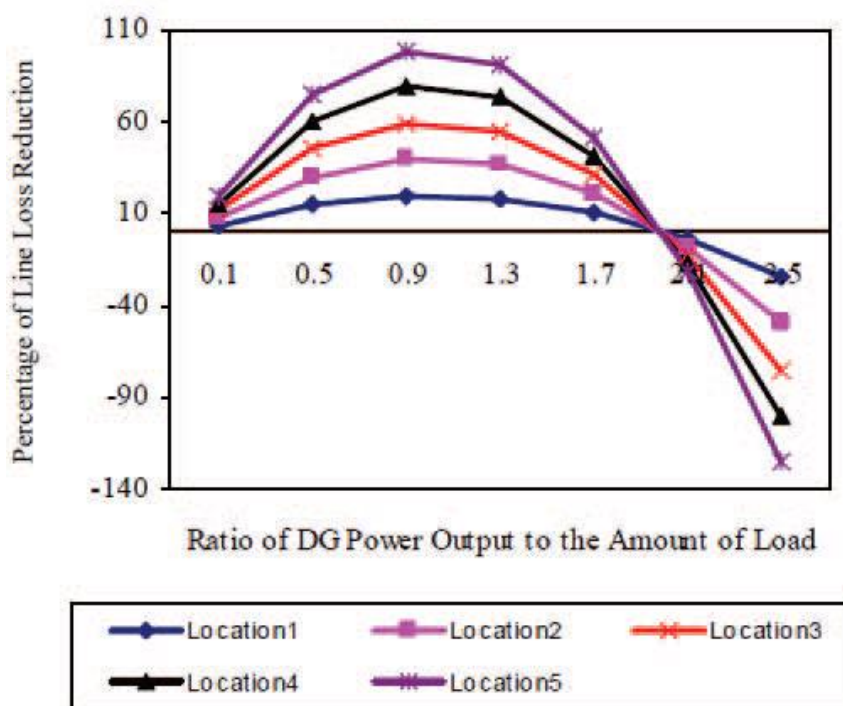


Figura 13 - Potência da GD x redução de perdas na linha em diferentes localizações

Fonte: DANG *et al.* (2011).

A partir da análise das figuras é possível perceber que tanto a capacidade da GD, quanto a sua localização em relação à fonte, são fatores determinantes para o grau de redução de perdas nas linhas. A Figura 12 mostra que a potência a ser instalada na GD deve ser dimensionada em conformidade com a carga que será suprida por ela. No estudo de caso, a potência da carga foi de 2 pu, logo, quando a geração distribuída ultrapassa essa potência, o fluxo de potência excedente soma-se ao fluxo proveniente da geração centralizada (hidrelétricas ou termelétricas), o que reduz o índice de diminuição de perdas nas linhas, ou seja, as perdas aumentam.

Outro aspecto percebido pela observação da Figura 13 é que o percentual de redução de perdas nas linhas é maior à medida que a GD é instalada mais próximo da carga. Tal fato é em decorrência do fluxo de potência ser menor antes da geração distribuída, visto que ela irá suprir a demanda de potência ativa e reativa da instalação a que está destinada.

2.5 APROVEITAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA

Segundo Campos (2011), a energia solar é a energia radiante recebida pela Terra, proveniente do sol. Composta por vasto espectro de frequências na região da radiação ultravioleta, da luz visível e da radiação infravermelho.

O aproveitamento da energia solar, basicamente é feito através de calor e eletricidade. O calor gerado no processo de geração de energia elétrica pode ser aproveitado para geração de energia térmica.

O aproveitamento de energia térmica para fluidos ocorre devido à convecção, que nada mais é que a transferência de calor pela matéria em movimento.

Um sistema básico de aquecimento de água por energia solar é composto por placas coletoras solares e um reservatório de água conhecido como boiler.

As placas coletoras são responsáveis pela absorção da radiação solar. A energia térmica absorvida pelas placas é transmitida para a água que circula no interior de suas tubulações.

O sistema também é composto por um reservatório térmico responsável por armazenar a água aquecida e liberar para a tubulação. Feito de cobre ou aço inox e revestido por uma camada de poliuretano para evitar ao máximo as perdas de calor.

Dessa forma, a água permanece aquecida e pronta para o consumo a qualquer hora do dia ou da noite conforme a Figura 14. A caixa de água fria alimenta o reservatório, mantendo-o sempre cheio.

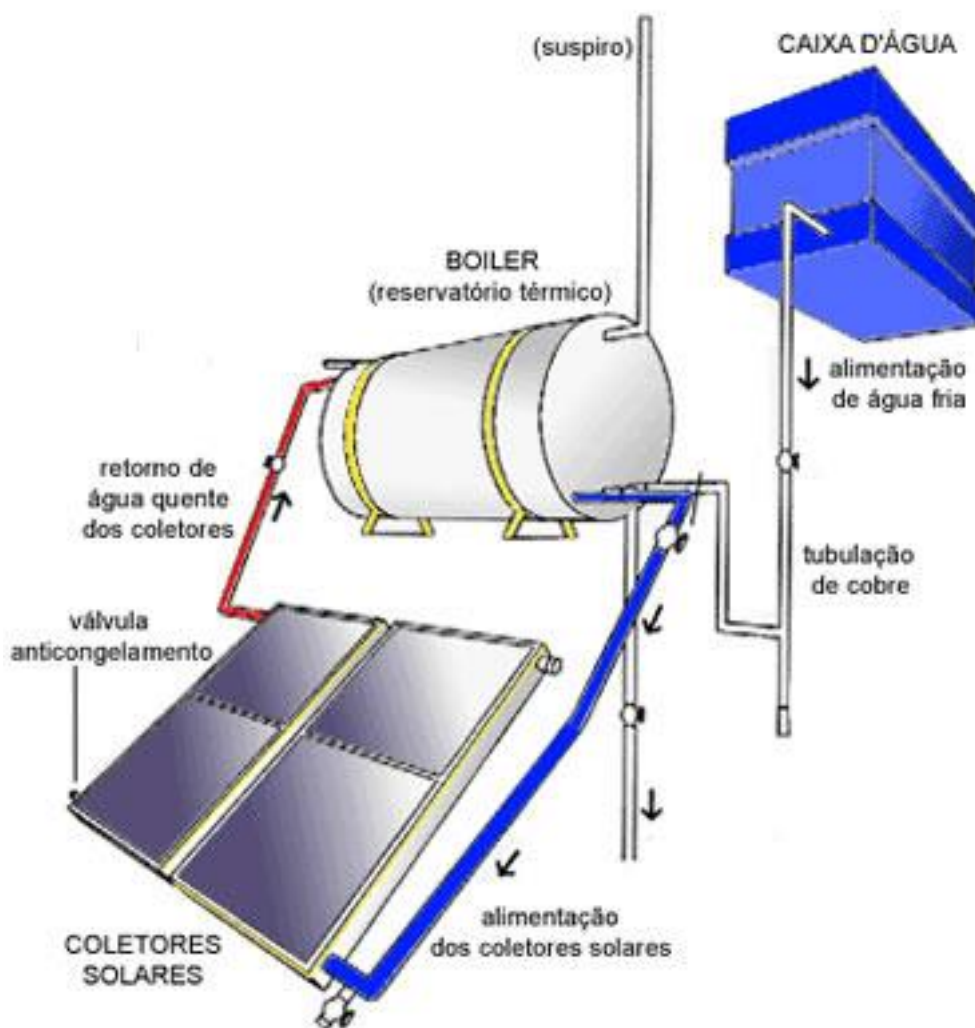


Figura 14 - Sistema de aproveitamento de energia térmica para aquecimento de água

Fonte: CAMPOS (2011).

2.6 SÍNTESE DE MEDIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Reis e Silveira (2001, p. 37) afirmam que se podem considerar certas medidas como ferramentas para a implantação do desenvolvimento sustentável:

- a redução do uso de combustíveis fósseis, como carvão, óleo e gás e, continuamente, substituí-los por combustíveis renováveis. Objetivo: tornar a matriz renovável em longo prazo;
- a importância de se aumentar a eficiência energética, da produção ao consumo, como forma de atender boa parte da crescente demanda por energia elétrica;
- mudanças no setor produtivo, envolvendo aspectos como materiais, transporte e combustíveis, com o objetivo de aumentar a eficiência energética;
- o aprimoramento das tecnologias do setor energético, visando encontrar alternativas ambientalmente benéficas. Incluem-se nesse quesito, melhorias nas atividades que dão a infraestrutura ao setor, que são a produção de materiais e equipamentos, além da exploração de combustíveis;
- redefinições do modelo político voltado para o setor de energia, favorecendo a formação de mercados para tecnologias ambientalmente benéficas;
- o incentivo do uso de combustíveis menos poluentes, tal como o gás natural, quando comparado ao petróleo ou o carvão. Pode ser considerada uma medida que, aplicada a curto prazo, contribui para reduzir os impactos ambientais;
- além disso, cabe destacar o compromisso selado neste ano, ao término da RIO+20, que foi a implementação das medidas acordadas, que estão reunidas no documento final “O futuro que queremos”, conforme Nassir Abdulaziz Al-Nasser, presidente da Assembleia Geral das Nações Unidas. O documento contemplou, principalmente, etapas como: o início do processo de estabelecimento de metas de desenvolvimento sustentável; o detalhamento da economia verde como ferramenta para se atingir o desenvolvimento sustentável; o fortalecimento do PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente); a promoção de medidas de avaliação da sustentabilidade

corporativa; e o desenvolvimento de uma estratégia de financiamento, com a criação do Banco de Investimentos Verdes (ver item 2.3.3) (ONUBR, 2012).

3 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RADIAÇÃO SOLAR

3.1 ATLAS SOLAR BRASILEIRO

A Figura 15 ilustra a radiação solar global horizontal, referente à média anual. O valor máximo de irradiação global foi 6,5 kWh/m², no norte do Estado da Bahia, próximo à fronteira com o estado do Piauí. A menor irradiação solar global, no valor de 4,25 kWh/m², ocorre no litoral norte de Santa Catarina, caracterizado pela ocorrência de precipitação bem distribuída ao longo do ano. A Figura 16 apresenta a radiação solar no plano inclinado, referente à média anual, cuja inclinação corresponde à latitude do local. Caso se desconsidere a topografia local, essa configuração é a que possibilita a máxima captação da energia solar incidente.

A irradiação solar sobre o plano inclinado apresenta forte influência do albedo de superfície. Os menores valores, em todas as regiões do Brasil, ocorrem durante os meses de Inverno, ao passo que os maiores níveis de irradiação no plano inclinado ocorrem na faixa que vai do nordeste ao sudeste durante a primavera (RÜTHER, *et al.*, 2006).

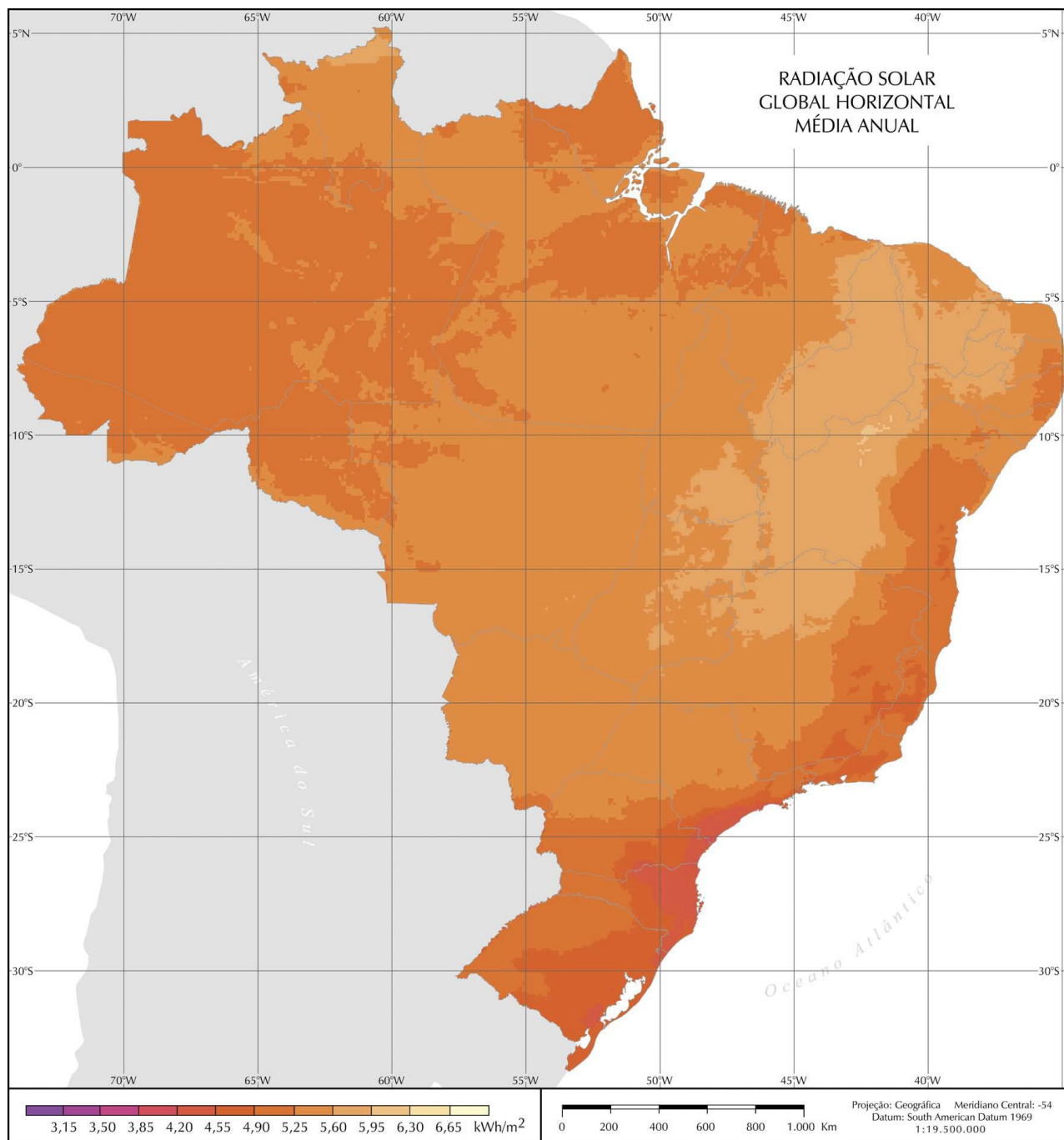


Figura 15 - Radiação solar global horizontal, média anual

Fonte: RÜTHER, *et al.* (2006).

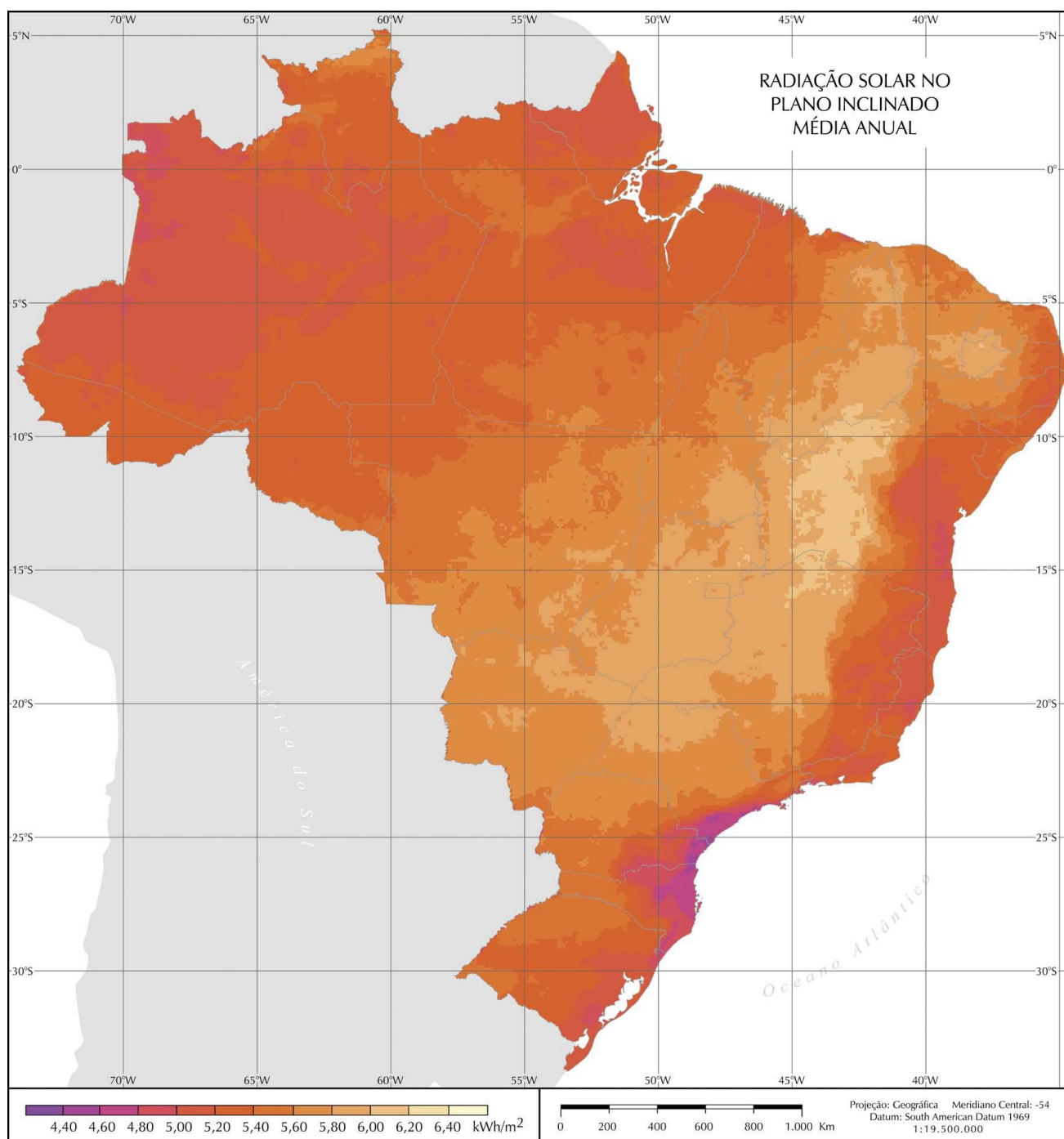


Figura 16 - Radiação solar no plano inclinado

Fonte: RÜTHER, et al. (2006).

3.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O efeito fotovoltaico foi descoberto por Edmond Becquerel, em 1839. Constatou-se, diante da incidência de radiação luminosa, que uma parcela é refletida e o restante é absorvido pelo material. Se o material for semicondutor, após a absorção da luz, haverá a transferência de energia dos fótons para as cargas elétricas, resultando no surgimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura deste material semicondutor (ZAMOSTNY, 2011).

Após vários estudos sobre estruturas de estado sólido, em 1876 foi concebido o primeiro aparato fotovoltaico. Após aprofundamentos em diversas teorias sobre a unidade fundamental no processo de geração fotovoltaica, a célula fotovoltaica, apenas em 1956 iniciou-se o processo de produção industrial (CRESESB, 2004, p. 18).

3.2.1 Radiação solar

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através de suas Normas Brasileiras (NBR), a radiação solar é medida geralmente em kW/m^2 e representa a densidade de fluxo de energia da radiação solar (NBR 10899, 1988, p. 2). A Terra recebe anualmente $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia solar. Esse valor é 10.000 vezes o consumo mundial de energia, no mesmo período. Esse fato resume que o potencial solar a ser explorado é vastíssimo, embora ainda existam fatores limitantes, como a eficiência das células fotovoltaicas, a disponibilidade de sol em certas regiões, e assim por diante. A célula fotovoltaica é um componente optoeletrônico capaz de converter diretamente radiação solar em eletricidade. É constituído de material semicondutor, no caso o silício é o mais utilizado. (CRESESB, 2004, p. 23).

3.2.2 Efeito fotovoltaico

A célula fotovoltaica é formada por material semicondutor. Esse material apresenta uma camada de condução sem elétrons e uma camada de valência preenchida por elétrons, a temperaturas muito baixas. A separação entre as duas camadas é chamada *gap* de energia, que representa a quantidade de energia para que o elétron salte de uma banda para a outra. A Tabela 5 ilustra o *gap* para diferentes materiais utilizados em células fotovoltaicas.

Tabela 5 - Energia do gap de alguns materiais usados em células fotovoltaicas

| Cristal | Energia do gap: E_{gap} (eV) |
|---------------------------|--|
| Germânio (Ge) | 0,66 |
| Silício (Si) | 1,12 |
| Arseneto de Gálio (GaAs) | 1,43 |
| Telureto de Cádmio (CdTe) | 1,56 |

Fonte: REZENDE (2004), adaptado.

Segundo o Cresesb, 2004, o efeito decorrente da incidência de radiação luminosa é que, fótons de luz, na faixa do visível, com energia superior ao *gap* provocam o deslocamento de elétrons da banda de valência para a banda de condução.

Outro aspecto fundamental para o funcionamento da célula fotovoltaica é o enriquecimento do silício, que é comumente combinado com átomos de fósforo, formando o dopante n, ou impureza n, que é caracterizado por possuir um elétron livre e, portanto, é responsável por doar elétrons.

Analogamente, o dopante p, ou aceitador de elétrons, é formado pela mistura de silício com átomos de boro. Tal estrutura possui um “buraco”, ou seja, um elétron faltante para atingir a estabilidade química, que são oito elétrons na camada de valência. Quando os dopantes n e p são colocados um sobre o outro, surge um campo elétrico na região do contato, e ocorre a transferência de elétrons, formando a junção pn, de acordo com a Figura 17.

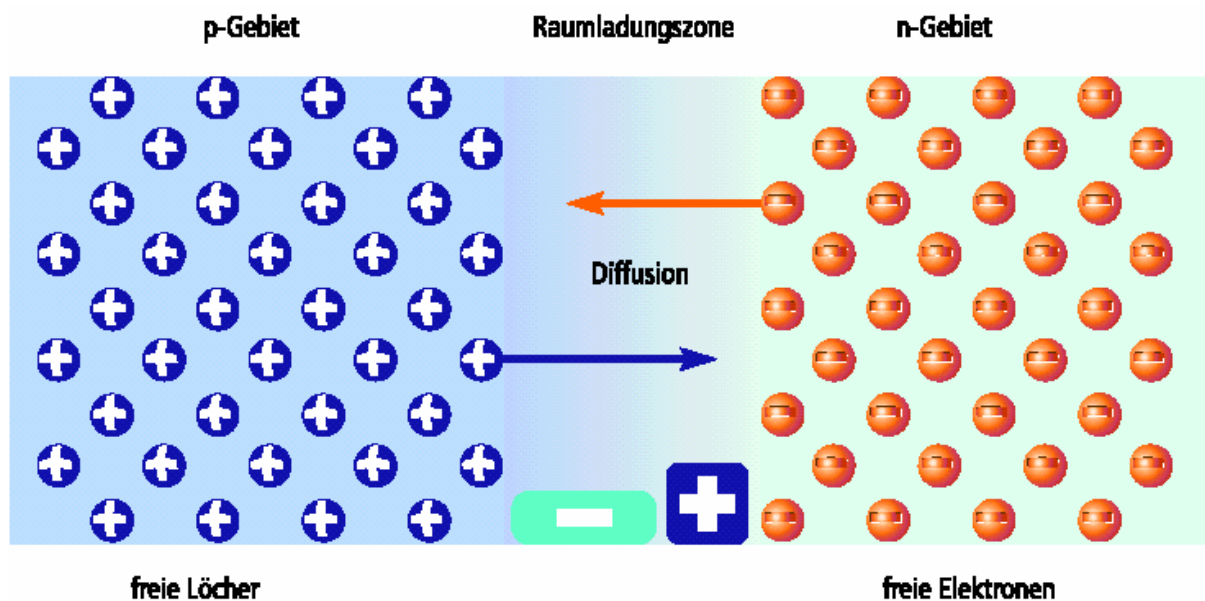


Figura 17 - Transferência de elétrons na junção pn

Fonte: GREENPRO (2004).

A junção n, por doar elétrons, torna-se uma carga positiva, ao passo que a junção p recebe os elétrons e passa ao estado de carga negativa, tendo-se formado, como foi dito, um campo elétrico. Na incidência de fótons de luz, com energia maior que o *gap* da junção pn, ocorrerá à geração de pares elétron-lacuna; se o campo elétrico na região for diferente de zero, as cargas serão aceleradas, caracterizando um fluxo de corrente através da junção, fruto da diferença de potencial, caracterizando o chamado efeito fotovoltaico. A partir disso, as duas extremidades de silício são conectadas por fios condutores, havendo a circulação de elétrons (CRESESB, 2004, p. 30).

A principal limitação do processo é que há mais fótons incidentes que elétrons a serem excitados, portanto parte da energia luminosa não é aproveitada para gerar eletricidade, mas é perdida na forma de calor. Outro fator limitante é que parte dos elétrons excitados não contribui para o fluxo de corrente, sendo essa parcela de perda reduzida com o aprimoramento do processo de produção dos módulos fotovoltaicos (CRESESB, 2004, p. 32).

3.2.3 A célula fotovoltaica

De acordo com a NBR 10899, célula solar é um transdutor que converte energia radiante solar diretamente em energia elétrica. É a unidade fundamental do sistema fotovoltaico, conforme citado em 3.2.2.

O material mais utilizado mundialmente é o silício (Si), que se subdivide em: cristalino (c-Si), multicristalino (m-Si), amorfo (a-Si) e microcristalino (μ -Si). Além desse material, há o telúrio (Te), cádmio (Cd), cobre (Cu), índio (I), gálio (Ga), selênio (Se), entre outros (RÜTHER, 2004). O grau de eficiência do silício, em escala comercial, varia de 12 a 17%, enquanto o limite teórico chega a 27% (CRESESB, 2004, p. 32).

As células de filme fino são objeto de diversas pesquisas ultimamente, que tem por objetivo tornar menores os custos de produção dos módulos fotovoltaicos. Esses estudos visam garantir um menor uso de material semicondutor, obtido de forma a possibilitar a produção em larga escala e, por fim, resultar em menores custos do produto final.

O silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), o Disseleneto de Cobre e Índio (CuInSe_2) ou CIS e CdTe estão entre os materiais mais estudados (CRESESB, 2004, p. 44). A célula fotovoltaica constituída de filmes finos, pode ter como base, também, o Arseneto de Gálio (GaAs) (OLIVEIRA, 2008). As células de GaAs, por sua vez, apresentam rendimento de 28%, o que explica seu alto custo, sendo utilizada para aplicações espaciais (BLUE SOL, 2011). A Figura 18 mostra um exemplo de célula fotovoltaica de silício monocristalino, enquanto a Figura 19 mostra células fotovoltaicas de silício policristalino.

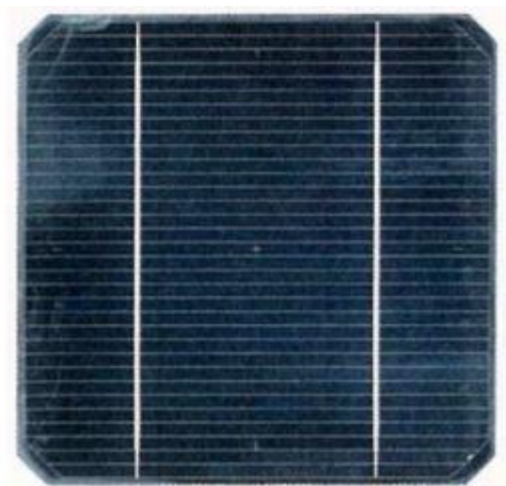


Figura 18 - Célula fotovoltaica de silício monocristalino

Fonte: BLUE SOL, 2011.

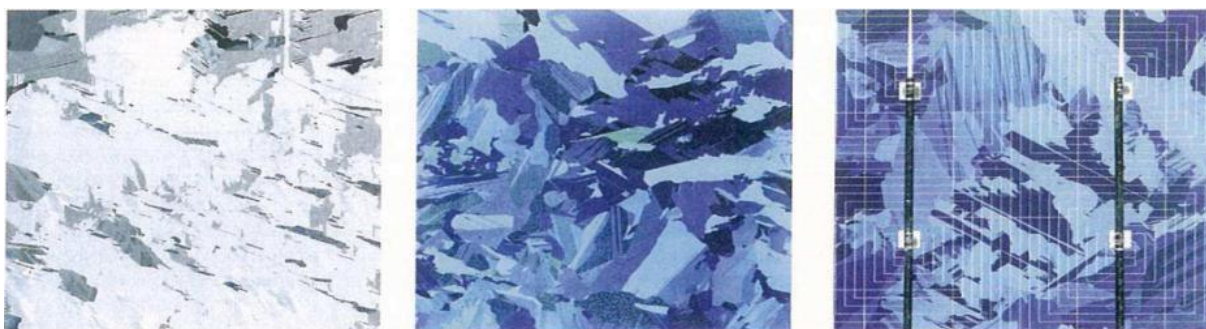


Figura 19 - Célula fotovoltaica de silício policristalino

Fonte: BLUE SOL, 2011.

3.2.3.1 Arranjo construtivo de células fotovoltaicas

Existem os seguintes tipos de arranjos construtivos: estrutura homojunção, estrutura heterojunção, estrutura de pino e estrutura multijunção, que serão detalhados abaixo, conforme Oliveira (2008):

- estrutura homojunção: as células constituídas por silício cristalino (c-Si) enquadram-se nessa categoria. A dopagem é feita em função de se obter a máxima absorção de energia luminosa, utilizando-se apenas um tipo de material. Aspectos a serem considerados, por exemplo, são: a impureza e cristalinidade do silício, a quantidade e distribuição de átomos dopantes nos materiais dos tipos p e n e, também, a espessura da superfície da junção pn.

- estrutura heterojunção: nesse caso, dois materiais semicondutores diferentes são unidos para formar a célula fotovoltaica. Por exemplo, nas células a base de CIS, os semicondutores Sulfato de Cádmio (CdS) e o CuInSe_2 formam a junção. A energia luminosa que incide sobre a célula gera elétrons e lacunas próximos da junção, evitando que eles se recombinem. A principal vantagem em relação à homojunção é que apenas um material deve ser dopado, desse modo o custo no processo de produção de materiais dopados é reduzido.
- estrutura P-I-N: caracteriza-se por possuir uma camada do tipo p, uma camada do tipo n e, entre as duas, uma camada de material intrínseco. Diante de incidência de luz, há a formação de elétrons e lacunas livres no material intrínseco e estes, por sua vez, são separados pelo campo elétrico gerado entre as camadas de materiais tipos p e n, o que resulta numa diferença de potencial na estrutura. Pode-se citar o exemplo do silício amorfo, que, por não fazer ligações covalentes, possui alta condutividade elétrica, proporcionando um índice baixo de diferença de potencial. A corrente elétrica origina-se, nesse caso, devido aos dopantes p e n que geram o campo elétrico no material intrínseco. As células a base de Telureto de Cádmio (CdTe), que são de filmes finos, possuem na camada superior o CdS, o Telureto de Zinco (ZnTe) na camada inferior e o CdTe intrínseco.
- estrutura multijunção: caracteriza-se por possuir várias camadas de células sobrepostas e com diferentes índices de *gap*, que é a energia que separa a banda de condução da banda de valência, conforme item 3.2.2. O maior *gap* é disposto na camada superior da estrutura e é responsável por absorver os fótons com maior energia, enquanto as camadas abaixo do topo são ordenadas de forma decrescente, em relação ao *gap*, de modo que o maior número possível de fótons possa ser absorvido. Por tal configuração, essa estrutura possui um elevado índice de conversão energética fotovoltaica.

3.2.4 Parâmetros importantes quanto à orientação dos módulos

Dentre os diversos parâmetros, podem-se citar alguns mais importantes quando se fala em geração fotovoltaica. A declinação solar (ϑ) é a posição angular do sol, ao meio dia solar, em relação ao plano do Equador. Sua variação é conforme os limites a seguir:

$$-23,45^\circ < \vartheta < 23,45^\circ$$

O ângulo de incidência (γ) é o ângulo formado entre os raios do sol e a normal à superfície de captação. O ângulo azimutal da superfície (a_w) é o ângulo entre a projeção normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul. O deslocamento angular é tomado a partir do norte, ou seja, quando a projeção está a esquerda da direção Norte-Sul o valor de a_w é negativo, em caso contrário esse valor será positivo. Assim sendo, a_w varia conforme o intervalo abaixo:

$$-180^\circ < a_w < 180^\circ$$

O ângulo azimutal do sol (a_s) é o ângulo entre a projeção do raio solar no plano horizontal e a direção Norte-Sul e sua variação é conforme o intervalo a seguir:

$$-180^\circ < a_s < 180^\circ$$

Altura solar (α) é o ângulo compreendido entre o raio solar e a projeção do mesmo sobre um plano horizontal. Inclinação (β) é o ângulo entre o plano da superfície em questão e a horizontal. A Figura 20 apresenta os principais parâmetros mencionados (CRESESB, 2004, p. 25).

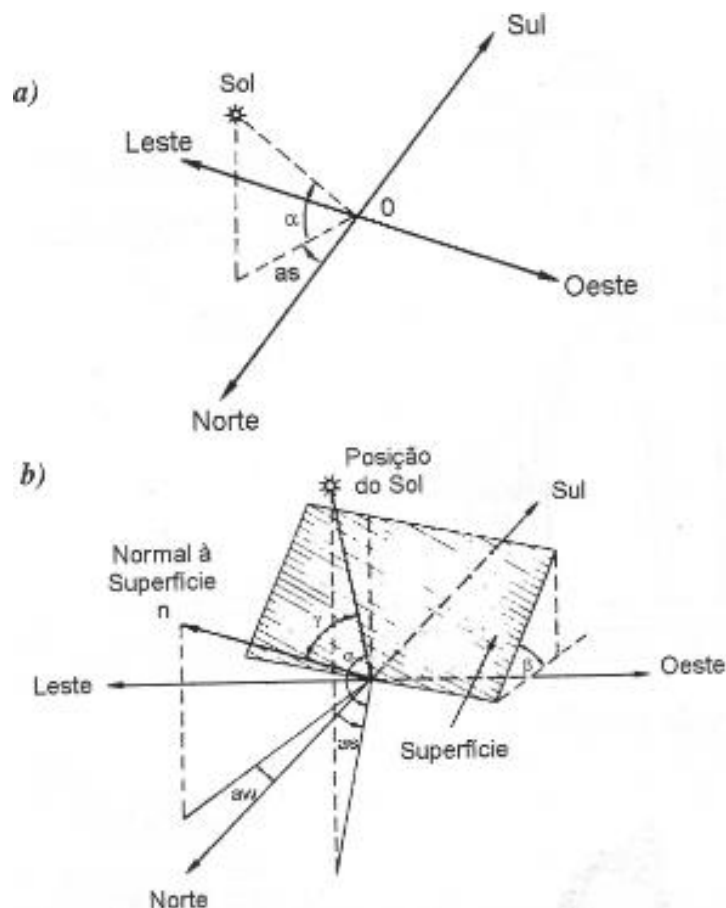


Figura 20 - Ilustração dos principais ângulos estudados
Fonte: CRESESB, 2004.

3.2.5 Configurações elementares para arranjos fotovoltaicos

Os dois tipos de arranjos fotovoltaicos são: autônomos ou conectados à rede. Os sistemas autônomos podem ser puramente fotovoltaicos, nesse caso são chamados isolados, ou SFI, enquanto os sistemas com geração fotovoltaica e alguma outra forma de geração, por exemplo, a geração eólica, são chamados híbridos. Sistemas autônomos costumam apresentar alguma forma de armazenamento de energia, como baterias, que tornam possível o suprimento de energia quando não há qualquer outra forma de obtê-la, como a ausência de sol e/ou vento, ou a ausência da rede de fornecimento de energia.

A Figura 21 mostra um SFI, ao passo que a Figura 22 mostra um sistema fotovoltaico interligado à rede elétrica.

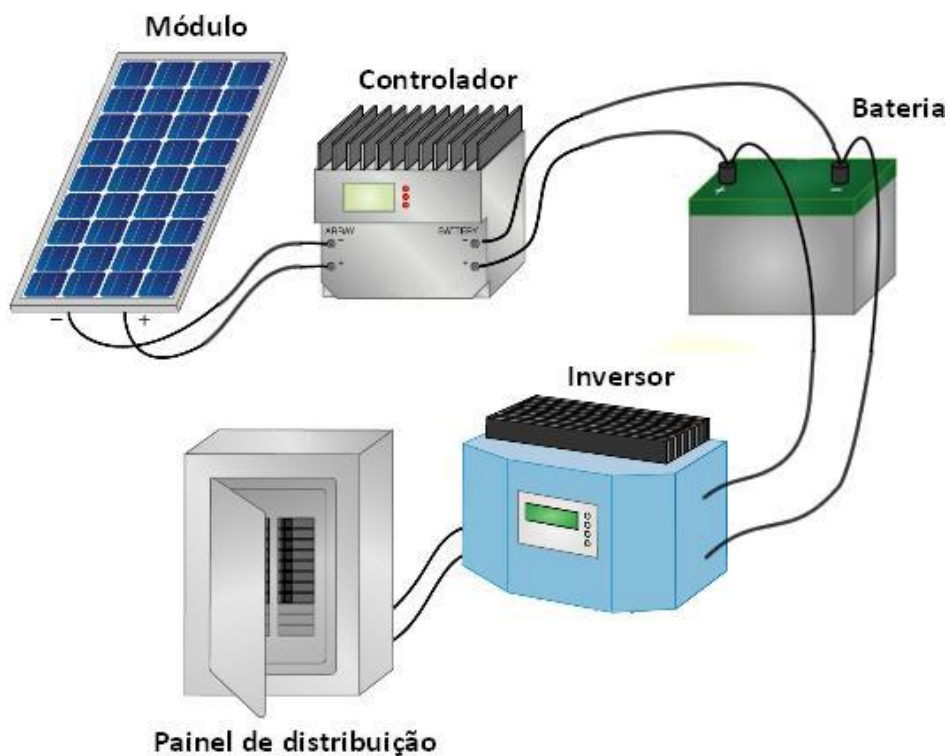


Figura 21 - Módulo fotovoltaico desconectado da rede

Fonte: BLUE SOL, 2011.

Para Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede, ou SFCR, no entanto, não é necessário o armazenamento, pois existe interação com a rede, que garante o suprimento de energia para a instalação em caso de insuficiência da energia elétrica gerada a partir dos módulos fotovoltaicos.

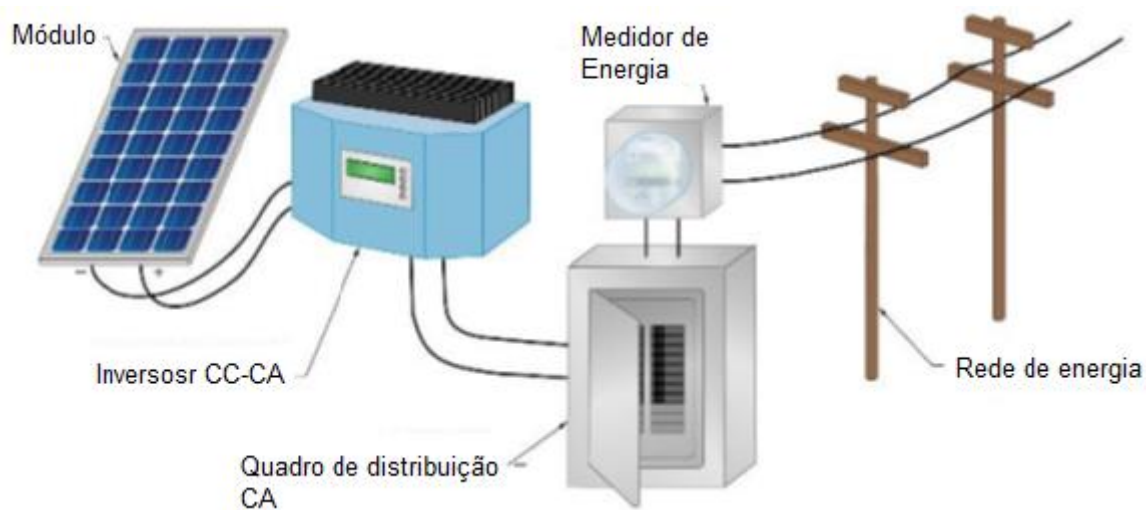


Figura 22 - Módulo fotovoltaico conectado à rede

Fonte: BLUE SOL, 2011.

3.2.6 Equipamentos utilizados

3.2.6.1 Módulo fotovoltaico



Figura 23 - Módulo fotovoltaico a base de silício monocristalino

Fonte: BLUE SOL, 2011.

A Figura 23 apresenta um módulo fotovoltaico a base de silício monocristalino. O módulo fotovoltaico é composto por um conjunto de células fotovoltaicas. Justifica-se o agrupamento das células em módulos primeiramente, para se obter tensões e correntes suficientes para atender as cargas desejadas e, em segundo lugar, mas igualmente importante, para se atingir um nível de proteção mínimo contra esforços mecânicos e fatores ambientais. Deve se pensar nas características de cada célula e, para não haver perdas de eficiência energética desnecessárias, se faz necessário que essas características sejam compatíveis.

Cada módulo deve possuir dois diodos, um em série e outro em paralelo, internos ou externos, de modo a protegê-lo, respectivamente, quanto a correntes

reversas e circulantes geradas pelos outros módulos (por exemplo, em um sistema), caso estes recebam menos radiação.

Segundo a NBR 11876, devem fazer parte das características elétricas do fabricante os dados de tensão em circuito aberto e corrente de curto circuito, determinados segundo norma de ensaios elétricos para as condições de $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ e 1000 W/m^2 .

É possível medir a tensão entre os terminais positivo e negativo de um módulo, como o da Figura 23, através de um voltímetro, quando não houver cargas conectadas, obtendo-se assim a chamada tensão de circuito aberto. Caso os terminais sejam curto circuitados será obtida a corrente de curto circuito, a partir de um amperímetro conectado em série com o arranjo.

A principal curva para o estudo do funcionamento de um módulo fotovoltaico é a curva característica $I \times V$, ou seja, corrente versus tensão. Essa curva é associada às condições em que foi obtida, como intensidade da radiação, temperatura, e assim por diante. A Figura 24 mostra a curva $I \times V$, para uma célula de silício monocristalino, normalizada pela corrente de curto circuito. O ponto de potência máxima é aquele para o qual se têm a máxima tensão e a máxima corrente e, conforme a Figura 25 e a Figura 26, existe um único ponto de máxima potência. Outro conceito considerado, em se tratando da qualidade da célula fotovoltaica, é o fator de forma. Esse fator expressa quanto à curva característica se aproxima de um retângulo e, quanto mais próxima estiver da forma retangular, maior a qualidade da célula (CRESESB, 2004, p. 43-46).

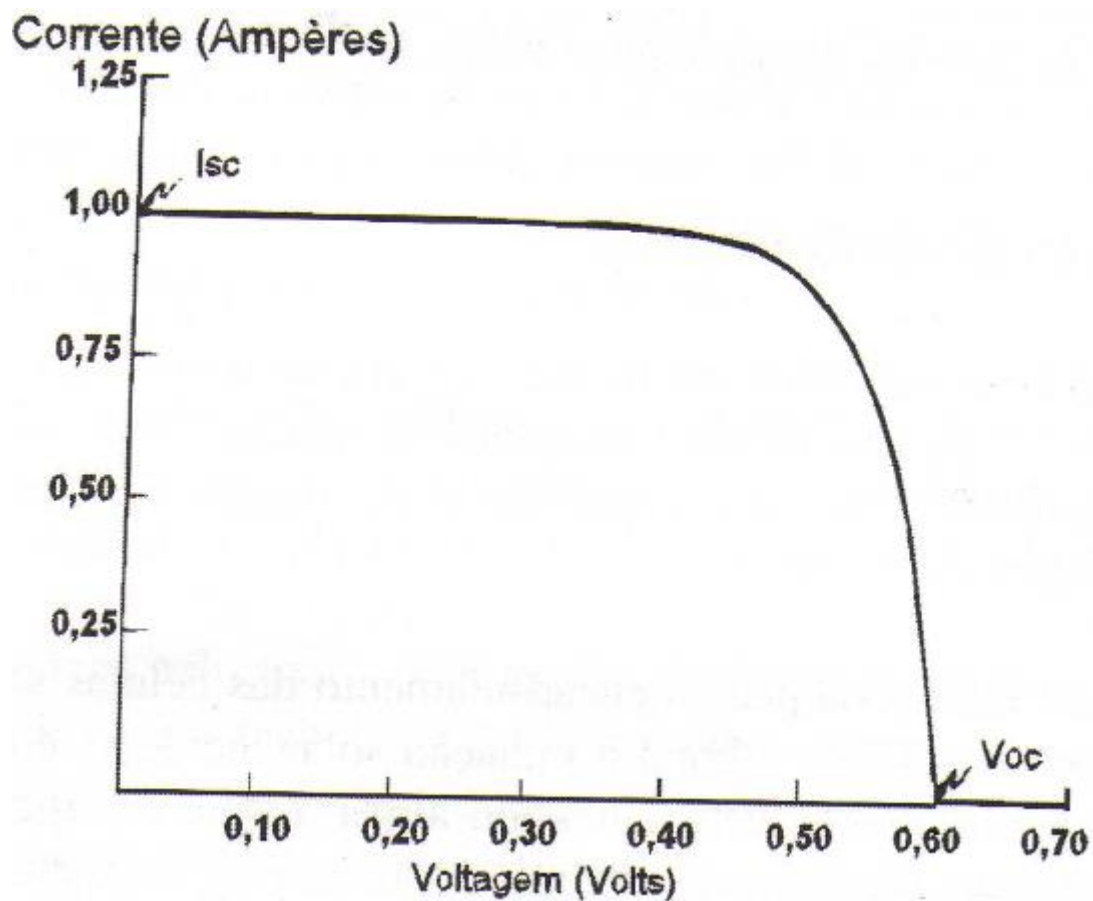


Figura 24 - Curva característica I x V, para célula de silício monocristalino

Fonte: CRESESB (2004).

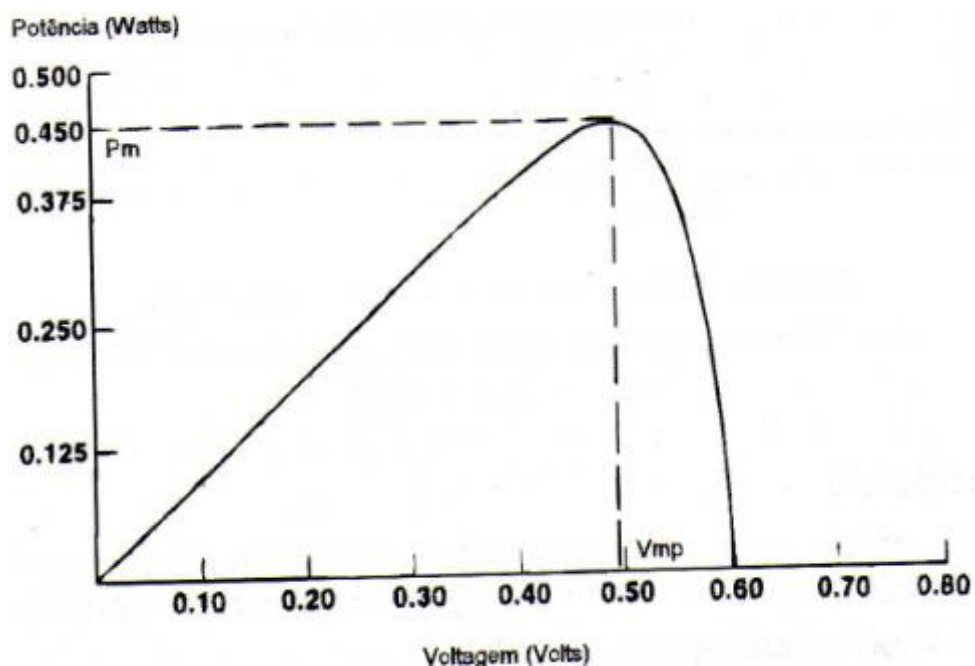


Figura 25 - Potência x tensão para célula de silício monocristalino

Fonte: CRESESB (2004).

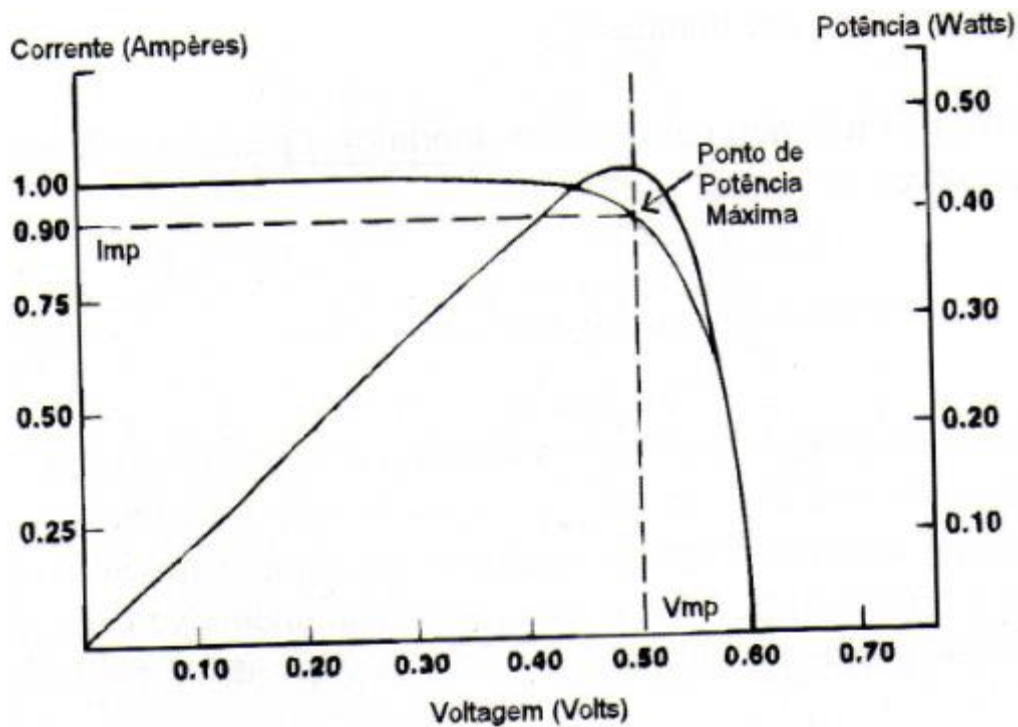


Figura 26 - Parâmetros de potência máxima

Fonte: CRESESB (2004).

Os cálculos são conforme é mostrado nas equações 12, 13 e 14 para potência máxima, eficiência e fator de forma, respectivamente.

$$P_m = I_{mp} \times V_{mp} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{(I_{mp} + V_{mp})}{(A \times I_C)} \quad (13)$$

$$FF = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{(I_{SC} \times V_{OC})} \quad (14)$$

onde:

P_m : potência máxima (W);

I_{mp} : corrente no ponto de potência máxima (A);

V_{mp} : tensão no ponto de potência máxima (V);

η : eficiência;

I_C : potência luminosa incidente (W/m^2);

A: área útil do módulo (m^2);

FF: fator de forma;

I_{SC} : corrente de curto-circuito (A);

V_{OC} : tensão de circuito aberto (V).

Assim sendo, os valores P_m , V_{mp} , I_{mp} , V_{OC} e I_{SC} são os cinco parâmetros que especificam o produto sob certas condições de radiação, temperatura de operação e massa de ar.

Quanto aos arranjos possíveis para os módulos, instalados de acordo com a potência desejada, tem-se:

- ligação série: a ligação é feita entre o terminal positivo de um módulo e o negativo de outro, como é mostrado na Figura 27.

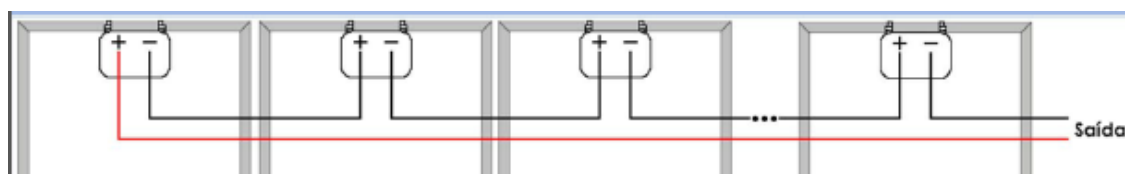


Figura 27 - Associação de módulos fotovoltaicos em série

Fonte: PINHO; ZILLES (2011).

- Nesse tipo de ligação a corrente que flui através dos cabos que conectam os módulos é a mesma, ao passo que a tensão é dada pela soma das tensões individuais, conforme as equações 15 e 16.

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (15)$$

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n \quad (16)$$

- É importante ressaltar que as correntes iguais nos módulos existem apenas em condições ideais, em que há a mesma radiação e temperatura incidentes ao longo dos módulos. No entanto, para efeitos de aproximação, podemos desprezar diferenças de pequena grandeza.
- ligação paralelo: esta ligação consiste na interligação dos terminais positivos dos módulos e, por sua vez, a interligação dos terminais negativos, como é ilustrado na Figura 28.

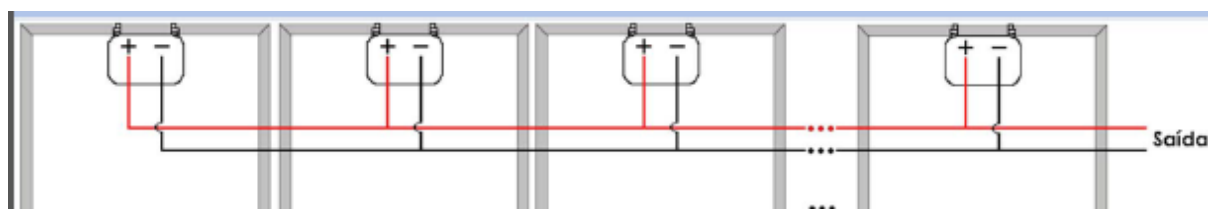


Figura 28 - Associação de módulos fotovoltaicos em paralelo

Fonte: PINHO; ZILLES (2011).

- Nessa situação, às correntes se somam, ao passo que a tensão é constante, conforme as equações 17 e 18.

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (17)$$

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n \quad (18)$$

- A mesma ressalva quanto à igualdade das correntes cabe aqui, para a igualdade das tensões.

Os fatores que influenciam os parâmetros elétricos de um módulo, que são a intensidade luminosa e a temperatura das células fotovoltaicas, são descritos a seguir:

- potência luminosa incidente: a corrente gerada por um módulo fotovoltaico e a potência luminosa incidente são grandezas diretamente proporcionais, cuja variação é aproximadamente linear, conforme a equação 19.

$$\frac{I_C}{I} = k \quad (19)$$

A Figura 29 ilustra o comportamento da curva I x V para diferentes irradiações solares (CRESESB, 2004, p. 50).

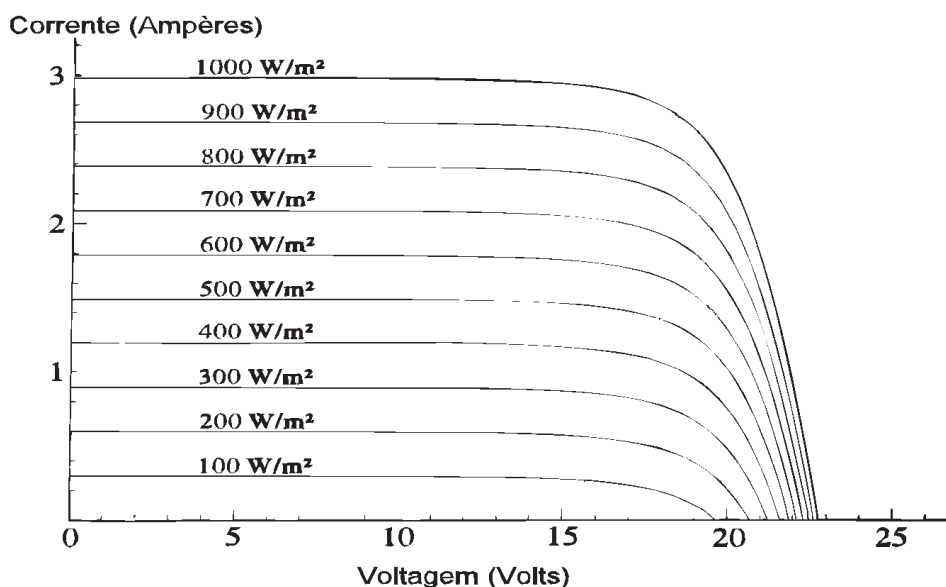


Figura 29 - Variações na curva I x V causadas pela potência luminosa incidente (Ic)

Fonte: CRESESB (2004).

- temperatura das células fotovoltaicas: a variação de temperatura em um módulo fotovoltaico de silício cristalino provoca efeitos na curva característica I x V. O aumento de temperatura provoca uma diminuição da tensão, enquanto que a corrente sofre uma elevação muito pequena, praticamente desprezível, de tal forma que a capacidade de geração de energia elétrica, pelo módulo, fique comprometida. Esse efeito, para uma potência luminosa incidente de 1000 W/m², causado na curva característica I x V, para diversas temperaturas, é mostrado na Figura 30 (CRESESB, 2004, p. 50).

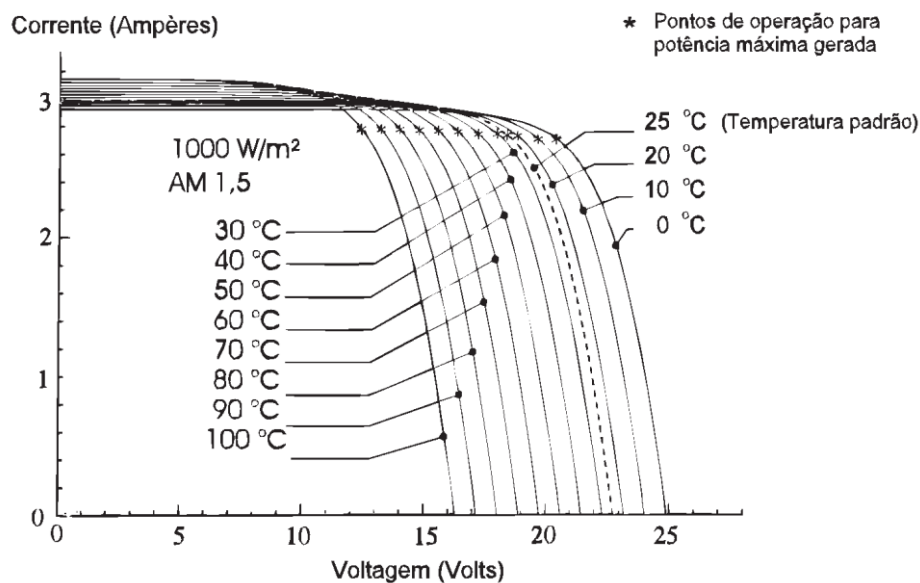


Figura 30 - Variações nas curvas I x V causadas pela temperatura em um módulo fotovoltaico de silício cristalino

Fonte: CRESESB (2004).

3.2.6.2 Baterias

Baterias são elementos capazes de armazenar a energia elétrica. Sua unidade fundamental é a célula eletroquímica, que é caracterizada por transformar a energia química em energia elétrica, num processo que pode ser entendido como uma conversão eletroquímica, ou seja, ocorre a produção de corrente contínua quando a bateria está conectada a um circuito elétrico.

As baterias podem ser compostas por células primárias ou secundárias. O que diferencia as duas classificações é que as células primárias compõem as baterias que não podem ser recarregadas, enquanto que as células secundárias constituem baterias passíveis de recarga. Essa segunda categoria, também chamada de acumuladores ou baterias de armazenamento, possui aplicação quando se é necessária a utilização por longos períodos, sem que para isso necessite-se trocar a bateria periodicamente, sendo, portanto, úteis para aplicações em sistemas fotovoltaicos (CRESESB, 2004, p. 51).

Os principais tipos de baterias comercializados, de acordo com Greenpro (2004), são:

- chumbo-ácido;
- níquel-cádmio;
- hidreto metálico de níquel (Ni-HM);
- íons de lítio (Li).

A bateria mais utilizada em sistemas fotovoltaicos é a do tipo chumbo-ácido. A Tabela 6 ilustra as vantagens deste tipo de bateria em relação a outros tipos, onde:

++: muito bom

+: bom

*: satisfatório

-: ruim

Tabela 6 - Comparação entre diferentes tipos de baterias

| Características | Chumbo-ácido | Ni-HM | Li |
|---------------------|--------------|-------|-----|
| Segurança | + | * | -/* |
| Energia específica | - | + | ++ |
| Potência específica | + | ++ | + |
| Custos específicos | + | - | * |
| Reciclável | ++ | * | * |

Fonte: JOSSEN et al. (2004), adaptado.

A célula eletroquímica, que é a unidade básica de uma bateria, é formada por um recipiente contendo dois eletrodos, um material ativo que participa da reação de carga e descarga, e uma solução eletrolítica. Durante o carregamento, o material ativo dos eletrodos reage com o eletrólito, que é um meio aquoso que possibilita a transferência de elétrons, resultando em corrente elétrica, segundo Cresesb (2004, p. 62), onde:

- dióxido de chumbo (PbO_2): material ativo do eletrodo referente ao terminal positivo, ou seja, o ânodo;
- chumbo poroso puro (Pb): material ativo do eletrodo referente ao terminal negativo, ou seja, o cátodo;
- ácido sulfúrico aquoso (H_2SO_4): eletrólito, caracterizado por permitir a circulação de elétrons. A concentração média de ácido é de 36% para 64% de água (CRESESB, 2004);
- sulfato de chumbo ($PbSO_4$);
- água (H_2O).

A reação global é mostrada na equação 20.



Quando é conectada uma carga à célula eletroquímica, os elétrons fluem do ânodo, que é oxidado, passam pela carga e chegam ao cátodo, onde o material ativo sofre redução, que é o ganho de elétrons. A Figura 31 ilustra esse processo:

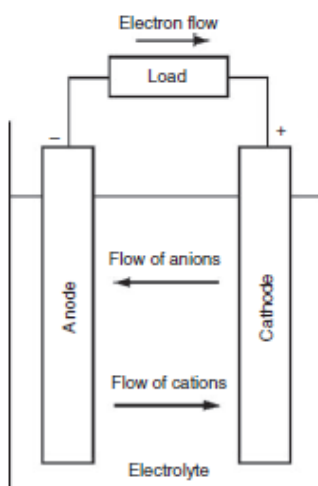
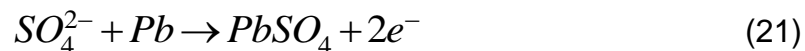


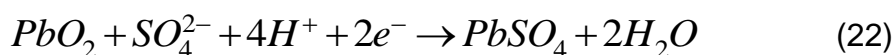
Figura 31 - Operação eletromecânica de uma célula.

Fonte: LINDEN (1995).

No eletrodo negativo, um ânion livre (SO_4^{2-}) da solução reage quimicamente com o material ativo, no caso o chumbo (Pb), conforme a equação 21:



Os elétrons fluirão através da carga e chegarão até o eletrodo positivo, onde ocorre a reação química mostrada em 22:



Dessa maneira, conclui-se que a água produzida diluirá o eletrólito, ou seja, o H_2SO_4 , o que provoca a diminuição da tensão nos pólos da bateria. Para reverter a reação deve ser ligada uma fonte de elétrons a placa negativa. Em seguida, o sulfato de chumbo presente nas placas reage formando, novamente, o Pb e o PbO_2 nos eletrodos negativo e positivo, respectivamente, além da formação do ácido sulfúrico e o consumo de água.

Antes de descrever cada conceito chave para o estudo das baterias, cabe apresentar uma breve definição de alguns termos utilizados, segundo Cresesb (2004, p. 53).

- tensão de corte: é o valor de tensão em que a descarga da bateria é interrompida. Sua especificação é de acordo com as condições operacionais ou a partir de valor determinado pelos fabricantes como tensão de final de descarga e, caso ultrapassada, pode comprometer a bateria;
- ciclo: é a sequência carga-descarga de uma bateria até uma determinada profundidade de descarga;
- auto-descarga: é uma taxa normalmente especificada como uma porcentagem da capacidade nominal que é perdida a cada mês, decorrente de reações químicas internas. As baterias de chumbo-ácido têm como característica uma alta taxa de auto-descarga e podem perder de 5 a 30 % por mês de sua capacidade, quando não utilizadas, dependendo da temperatura e composição química da célula. O

intervalo percentual médio de auto-descarga das baterias de níquel-cádmio é de 3 a 6% ao mês;

- sulfatação: formação de cristais de sulfato de chumbo nas placas de uma bateria chumbo-ácido. Pode ser causada por deixar-se este tipo de bateria descarregada por prolongados períodos de tempo e pode causar, por exemplo, o aumento da resistência interna;
- equalização: processo em que se busca igualar o estado de carga das células que compõem uma bateria. Para as baterias chumbo-ácido este processo é dimensionado para levar todas as células à carga plena. Alguns tipos de baterias requerem uma descarga total durante o processo;
- eficiência: pode ser expressa de duas formas distintas, a eficiência faradaica e a eficiência energética. A primeira é expressa pelo quociente entre a carga retirada de uma bateria em Ah e a quantidade necessária de Ah para reestabelecer o estado de carga inicial. Calcula-se como a razão entre a integral da corrente ao longo do tempo de descarga e carga. A eficiência energética é a relação entre a energia retirada da bateria na descarga e a quantidade de energia necessária para restaurar o estado inicial de carga (VERA, 2009).

Os conceitos chave para o estudo de baterias são: capacidade, profundidade de descarga, estado de carga, processo de carga e aspectos de controle para carga e descarga.

- Capacidade

Segundo Unipower (2005), é medida em Ah e significa a quantidade de carga elétrica de uma bateria. A capacidade nominal é expressa sob as seguintes condições:

- regime de descarga de 10 horas com corrente constante;
- temperatura de 25 °C;
- tensão de corte de 1,75 V por célula ou 10,5 V por bateria.

A Figura 32 ilustra o perfil de descarga de uma bateria de chumbo-ácido, para diferentes correntes de descarga. Os dados de fábrica da bateria são: capacidade de 100 Ah, padrão de descarga de 20 horas, com tensão de corte de 10,5 V.

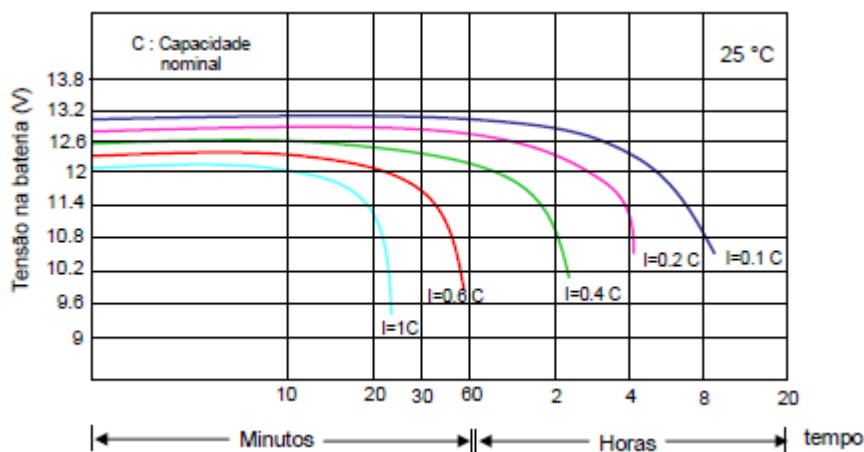


Figura 32 - Perfil de descarga para baterias de chumbo-ácido, para diferentes valores de corrente de descarga

Fonte: UNIPOWER (2005), adaptado.

Outro fator que interfere na descarga de uma bateria de chumbo-ácido é a temperatura de operação. Quanto maior for a temperatura, maior será a capacidade disponível da bateria.

- Profundidade de descarga e estado de carga

Estes conceitos são complementares, pois, enquanto a profundidade de descarga representa a quantidade de carga retirada da bateria, o estado de carga indica o quanto de carga a bateria armazena. Por exemplo, se o estado de carga de uma bateria vale 20%, significa que a profundidade de descarga para essa bateria foi de 80%. A Figura 33 mostra a capacidade de retenção de carga em função do número de ciclos, para diferentes profundidades de descarga.

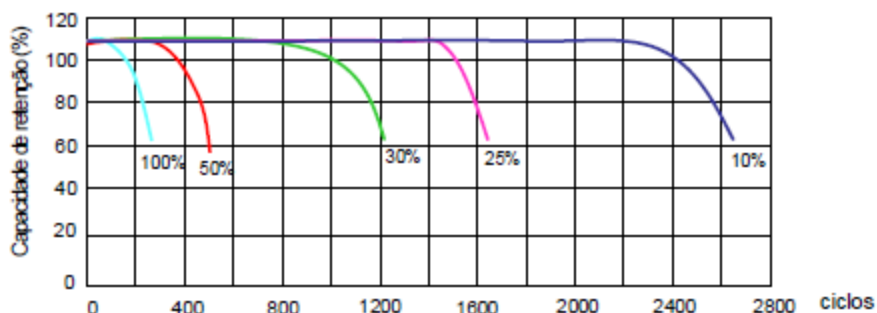


Figura 33 - Capacidade de retenção de carga em função do número de ciclos

Fonte: UNIPOWER (2005), adaptado.

Pode-se observar que quanto maior a profundidade de descarga, mais rapidamente, isto é, em um menor número de ciclos, a bateria perderá sua função, que é o armazenamento de energia.

Um indicador utilizado para verificar o estado de carga de baterias que permaneceram um tempo em repouso, isto é, sem carga ou recarga, é a tensão de circuito aberto (LINDEN, 1995). A Figura 34 apresenta a tensão de circuito aberto em função do estado de carga.

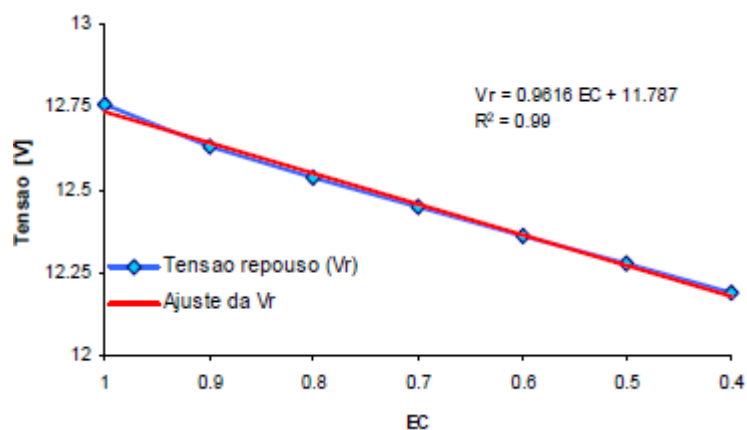


Figura 34 - Tensão de circuito aberto x estado de carga

Fonte: LINDEN (1995), adaptado.

Cabe citar, conforme a Figura 35, que as baterias de chumbo-ácido apresentam maior vida útil quanto menor for a temperatura de operação e a profundidade de descarga.

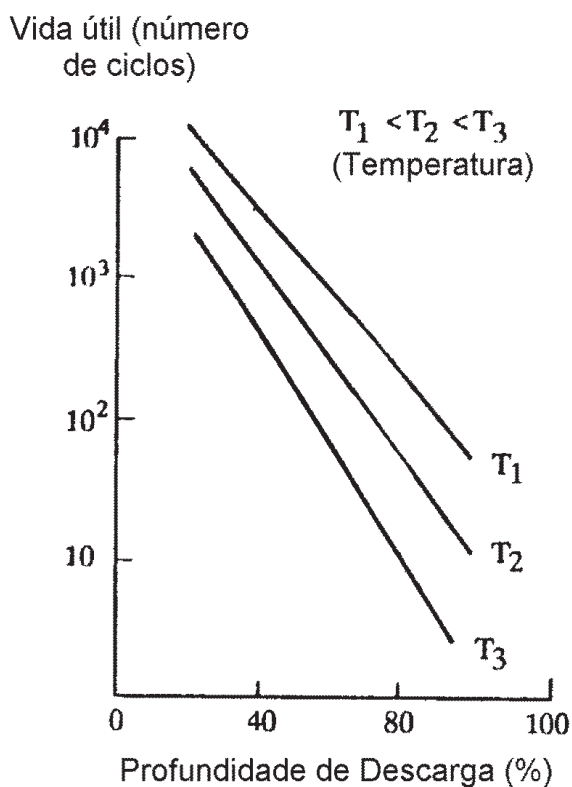


Figura 35 - Vida útil em função da profundidade de descarga, para diferentes temperaturas

Fonte: CRESESB (2004).

- Processo de carga

Segundo Rocha, 2005, o processo de recarga mais apropriado para sistemas fotovoltaicos é o método por tensão constante e limitação de corrente. É recomendada uma divisão do processo em três regiões, a região 1: carga profunda; a região 2: sobrecarga; e a região 3: carga de flutuação.

A Figura 36 mostra as curvas de corrente e tensão sobre uma bateria de chumbo ácido, com recarga a tensão constante e limitação de corrente, durante o processo de carga.

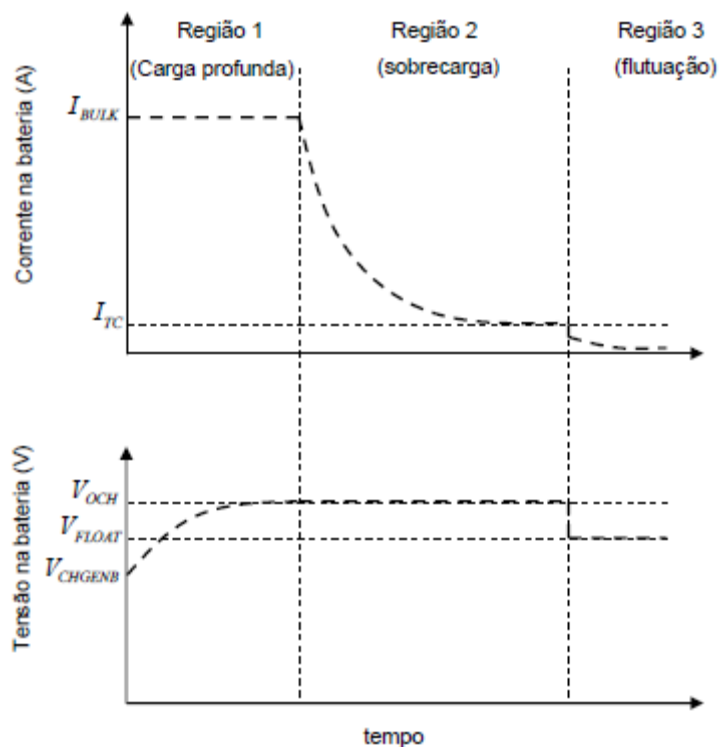


Figura 36 - Curvas de corrente e tensão para o processo de carga
Fonte: ROCHA (2005).

- região 1: a tensão V_{CHGENB} corresponde ao valor limite, quando a bateria está completamente descarregada. Nessa condição é fornecida uma corrente de recarga constante I_{BULK} . Essa corrente é aplicada até que o valor da tensão atinja o valor máximo de sobrecarga de tensão V_{OCH} ;
- região 2: o controlador mantém o nível de tensão em V_{OCH} . Pode-se notar o fim do processo de carregamento quando a corrente de recarga cai para um valor predeterminado I_{TC} . Este valor é da ordem de 1% da capacidade da bateria;
- região 3: a tensão aplicada reduz-se para V_{FLOT} . A corrente de recarga nesta etapa serve apenas para compensar a auto-descarga. Têm-se a chamada condição de flutuação, que segundo Cresesb, 2004, é o processo de carga que busca manter as baterias ou células com um

estado de carga próximo à carga plena, evitando que as mesmas permaneçam por longos períodos com estado parcial de carga.

Após o carregamento completo da célula, ocorre um fenômeno de gaseificação, em que são produzidos os gases hidrogênio e oxigênio. O que provoca esse fenômeno é o fato da tensão limite, até a qual não há produção de gases, ser ultrapassada, pois todo o material ativo foi utilizado, e a célula não consegue converter a corrente de carga em energia eletroquímica. A partir desse instante, a tensão da célula excede o limite, ocorrendo a reação de eletrólise da água, mostrada na equação 23.



As células seladas necessitam de um controle que impeça a evolução desses gases hidrogênio e a consequente perda de água no eletrólito. Outro fator que desencadeia o processo de gaseificação é a auto-descarga.

A solução adotada para as células seladas é explicada a seguir, segundo Cresesb (2004, p. 64). Existe um ciclo interno de oxigênio que flui das placas positivas para as placas negativas, de forma que a placa positiva é totalmente carregada antes do carregamento completo da placa negativa. Isso se explica pelo fato da placa positiva ser menor que a placa negativa. Então, apenas a placa positiva produz gás, no caso o gás oxigênio (ver equação 22). Esse gás flui através do eletrólito e atinge a placa negativa, produzindo sulfato de chumbo e água. O carregamento transforma o sulfato de chumbo em chumbo, restabelecendo o equilíbrio químico da célula.

Existe ainda, outra tecnologia que vem sendo explorada, chamada de válvulas de recombinação catalítica, que, utilizando o oxigênio e hidrogênio provenientes da eletrólise, produzem água novamente.

As desvantagens principais das células seladas:

- custo;
- ciclo de vida muito reduzido para descargas profundas;
- não podem ser distribuídas e/ou armazenadas sem eletrólito;

- longos períodos sem recarregamento podem causar sulfatação, que é um efeito que provoca a redução da capacidade das células. Entre os agravantes da sulfatação, pode-se citar também: carregamentos baixos ou parciais prolongados; operação contínua acima de 45°C; permitir que o eletrólito torne-se fortemente concentrado.

Algumas soluções para a sulfatação:

- carregar a célula regularmente para que todo o sulfato de chumbo seja convertido;
 - após aplicações em ciclos profundos, efetuar recarrega imediata;
 - inserção de aditivos nos materiais ativos para retardar a taxa de sulfatação;
- Aspectos do controle de carga: o sistema destinado ao controle da carga deve ter por finalidade, carregar a bateria de maneira eficiente, evitando as consequências indesejáveis de sobrecargas. A Figura 37 e a Figura 38 ilustram, respectivamente, curvas típicas de carga e descarga das células chumbo-ácido abertas, para diferentes valores de corrente.

As células chumbo-ácido abertas tem a possibilidade de resistir a uma quantidade moderada de sobrecarga, necessitando, para isso, de um caminho para que os gases hidrogênio e oxigênio escapem. Deve-se considerar que as reações de produção desses gases são exotérmicas, o que acarreta aumento de temperatura da célula e pode trazer complicações para os materiais que compõem a bateria.

Alguns itens recomendáveis para preservar a vida útil de uma bateria:

- a manutenção do estado de carga em baterias chumbo-ácido (equalização e flutuação);
- a operação em ambientes de temperatura controlada;
- o controle de sobrecargas e sobredescargas.

Tensão da célula (VCC)

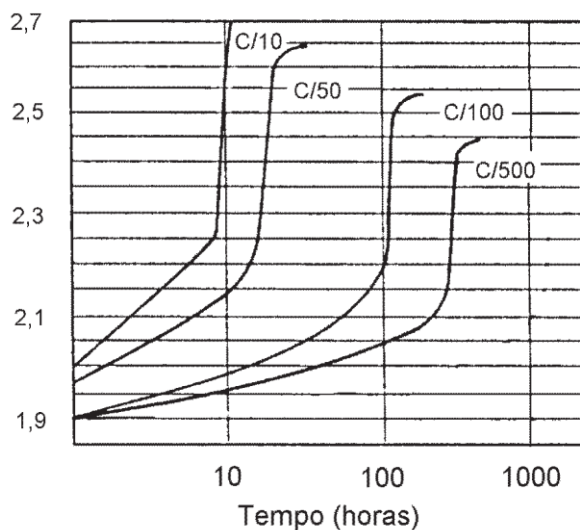


Figura 37 - Tensão da célula em função do tempo para diferentes taxas de carga

Fonte: CRESESB (2004).

Tensão (VCC)

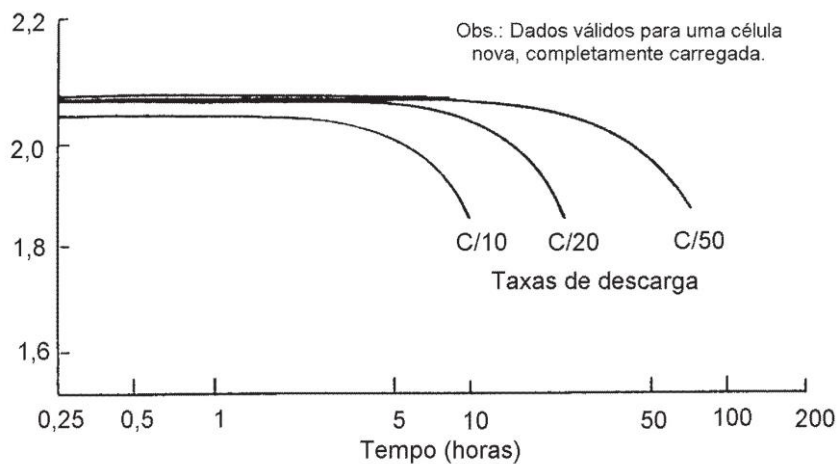


Figura 38 - Tensão da célula em função do tempo para diferentes taxas de descarga

Fonte: CRESESB (2004).

Em síntese, o dimensionamento do banco de baterias para sistemas fotovoltaicos, requer as principais considerações:

- suportar descargas profundas sem elevadas quedas na vida cíclica;
- necessidade de pouca ou nenhuma manutenção;

- carregamento de alta eficiência;
- taxa de auto-descarga baixa;
- confiabilidade;
- trabalhar fora da faixa de temperatura operacional sem perdas de desempenho.

3.2.6.3 Controlador de carga

Segundo Cresesb (2004), controlador de carga é um equipamento praticamente necessário para viabilizar um sistema fotovoltaico isolado da rede, que é aquele em que a presença de banco de baterias se torna necessário. A sua função é maximizar a transferência de energia da geração fotovoltaica, nos módulos fotovoltaicos, para o banco de baterias. Além disso, proteger as baterias contra cargas e descargas elevadas.

Os critérios para o dimensionamento de um controlador de carga são: quanto ao tipo de bateria, o regime de operação e a tensão e corrente de operação. As operações principais do controlador de carga envolvem o chaveamento entre o banco de baterias e o arranjo fotovoltaico. O arranjo fotovoltaico é desconectado do banco de baterias quando é atingido o estado de carga plena, para evitar sobrecarga das baterias. E o oposto também é válido, ou seja, quando as baterias encontram-se com um estado de carga muito baixo, o fornecimento de energia pelo banco de baterias é interrompido, para evitar sub carregamento.

A medição do estado de carga pode ser de algumas formas, entre elas: integração da corrente que entra e sai em relação ao tempo, medição da pressão interna da bateria e medição da tensão nos terminais da bateria. O método mais comum é o da medição da tensão nos terminais da bateria e o controle se dá, justamente, por um valor mínimo correspondente ao menor estado de carga possível, e um valor máximo, referente ao maior estado de carga possível. Além disso, a densidade do eletrólito pode ser um parâmetro para o controle.

A Figura 39 e a Figura 40 mostram dois tipos existentes de controladores de carga, os do tipo *shunt* e os do tipo série, respectivamente.

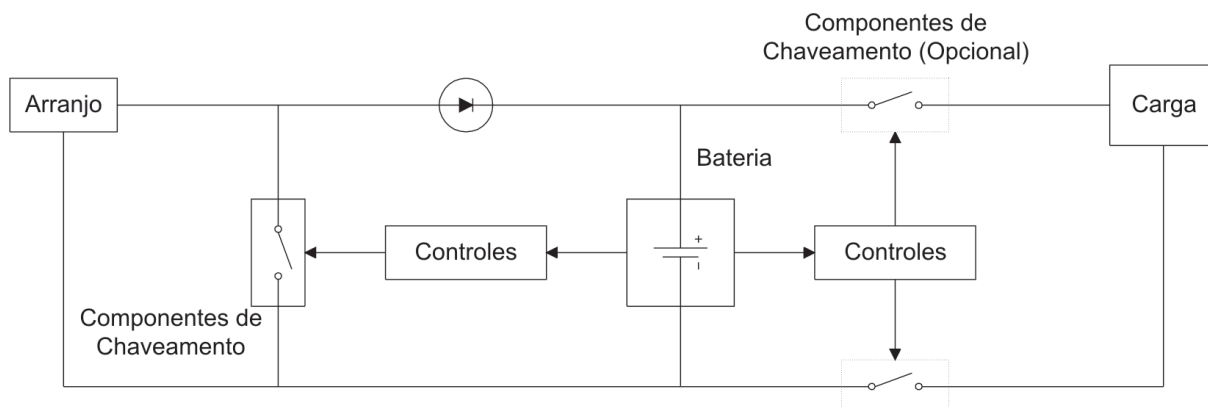


Figura 39 - Controlador shunt com LVD opcional

Fonte: CRESESB (2004).

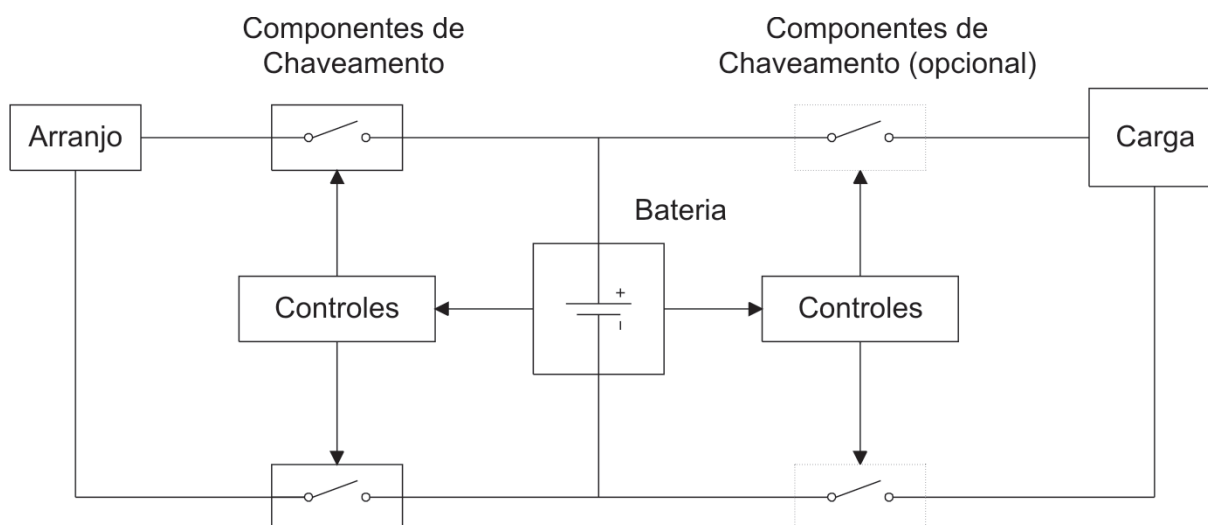


Figura 40 - Controlador série com LVD opcional

Fonte: CRESESB (2004).

Conforme a Figura 39, o controlador tipo *shunt* requer um diodo de bloqueio conectado em série entre o elemento de chaveamento e a bateria, para protegê-la de curto circuito caso a corrente do arranjo seja desviada. O controlador tipo série utiliza um relé eletromecânico ou uma chave de estado sólido, que faz o desligamento do arranjo fotovoltaico quanto o estado de carga na bateria é máximo.

Foram citados alguns parâmetros de especificação dos controladores de carga, como o tipo de bateria, o regime de operação e a tensão e corrente de operação. Além disso, têm-se as características abaixo, que são desejáveis para controladores de carga:

- terminais exclusivos para modificação de tensão das baterias;
- proteção contra inversão de polaridade;
- baixo consumo próprio;
- seguidor do ponto de máxima potência (MPPT);
- desvio da energia do arranjo;
- alarmes e indicações visuais;
- compensação térmica;
- desconexão da carga (para proteger contra descargas excessivas);
- proteção contra corrente reversa;
- *set points* ajustáveis;
- estratégias de controle especiais, por exemplo, *Pulse Width Module* (PWM).

Entre alguns fatores importantes têm-se o termo técnico de origem inglesa, *set point*. Esse termo refere-se aos valores dos parâmetros que controlam a operação dos controladores de carga. Outro aspecto é a compensação térmica, que é justificada para casos em que a temperatura varia na faixa de 5°C em relação a temperatura ambiente, que é considerada 25°C. Nesse caso, existe um sensor de temperatura instalado próximo das baterias que permite o ajuste dos *set points*, em função da temperatura, normalmente na faixa de - 6 a - 4 mV/célula/°C, para baterias chumbo-ácido.

Pode-se citar também o item desconexão da carga, que vem da sigla em inglês LVD, ou seja, *Low Voltage Disconnect*. Essa função serve para proteger a bateria de descarregamentos excessivos. Esse sistema pode funcionar, principalmente, através de desconexão imediata de toda a carga, quando se atinge determinado valor mínimo de tensão nas baterias; através de aviso luminoso, para o

usuário saber que o nível de tensão é baixo, e a partir disso, desconectar as cargas para a bateria ser recarregada. Alguns controladores podem acionar um suprimento de energia auxiliar, quando ocorre situação de baixo estado de carga nas baterias. Um aspecto importante para certos tipos de carga, como motores, é que a corrente não pode exceder o valor máximo para o dispositivo que faz o chaveamento, que se encontra no interior do controlador de carga. Alguns controladores que possuem a função LVD, utilizam um temporizador, comumente de 5 a 10s, para evitar que a carga se desconecte em função das altas correntes por curtos períodos de tempo, por exemplo, a corrente de partida de um motor.

A Figura 41 ilustra o comportamento de certos parâmetros, para um controlador de carga baseado em tensão, em diferentes arranjos fotovoltaicos (6 V, 12 V, 24 V, etc.)

| Parâmetros | Tensões Nominais (Volts) | | | | | |
|---|--------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| | Unidades | 6 | 12 | 24 | 36 | 48 |
| Máx. Tensão de Circuito Aberto do Arranjo | Volts | 22 | 22 | 44 | 66 | 88 |
| Queda de Tensão | Volts | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,90 | 0,90 |
| Término do Carregamento ¹ | Volts | 7,1 ± 0,1 | 14,3 ± 0,2 | 28,6 ± 0,4 | 42,9 ± 0,6 | 57,2 ± 0,8 |
| Reinício do Carregamento ¹ | Volts | 6,6 ± 0,2 | 13,2 ± 0,3 | 26,4 ± 0,6 | 39,6 ± 0,9 | 52,8 ± 1,2 |
| Consumo de Corrente | Miliampères | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Faixa da Temperatura de Operação | °C | -20 a 50 | -20 a 50 | -20 a 50 | -20 a 50 | -20 a 50 |
| Faixa da Temperatura de Armazenamento | °C | -55 a 85 | -55 a 85 | -55 a 85 | -55 a 85 | -55 a 85 |
| Tensão de Desconexão ¹ | Volts | 5,8 ± 0,2 | 11,5 ± 0,2 | 23,0 ± 0,4 | 34,5 ± 0,6 | 46,0 ± 0,8 |
| Reconexão ¹ | Volts | 6,5 ± 0,2 | 13,0 ± 0,2 | 26,0 ± 0,4 | 39,0 ± 0,6 | 52,0 ± 0,8 |

Figura 41 - Set points para controlador de carga baseado em tensão

Fonte: CRESESB (2004).

Algumas dificuldades existentes para esses tipos de controladores é que a tensão varia muito lentamente na faixa de 30 a 80% do estado de carga, o que acaba dificultando a necessidade, por exemplo, de se precisar um valor respectivo de tensão para um estado de carga de 50%.

3.2.6.4 Inversor

O Cresesb (2004) define inversor como um dispositivo capaz de converter um fluxo de potência em corrente contínua (CC), para corrente alternada (CA). Tal função é importante, pois as instalações elétricas possuem, em geral, cargas CA. Dessa forma, o inversor torna disponível para o consumo a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos. Essa conversão de energia deve ser o mais eficiente possível, visando o mais baixo índice de perdas e produção de harmônicos.

Dentre os mecanismos de chaveamento, têm-se a base de: transistor de potência; retificador controlado de silício ou *Silicon controller rectifier* (SCR); *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT). Quanto aos tipos de conversores, pode-se citar:

- conversores de estado sólido ou eletrônicos;
- conversores rotativos ou eletromecânicos;

O conversor eletrônico será abordado neste trabalho.

Outro critério de classificação é com relação ao tipo de controle para o processo de inversão. Existem os inversores comutados pela rede, que são controlados pela tensão da rede elétrica, e os inversores auto comutados, cujo controle é pelo próprio inversor.

Para dimensionamento do inversor é levado em conta, basicamente: a potência elétrica nominal a ser demandada pelas cargas; o pico de potência que pode ser de duas a sete vezes a potência nominal, por exemplo, para o acionamento de motores.

Os itens abaixo se referem a características encontradas em inversores:

- formas de onda

Dependem do método de conversão e dos filtros utilizados para suavizar e eliminar os harmônicos. A Figura 42 ilustra formas de onda para diferentes tipos de inversores.

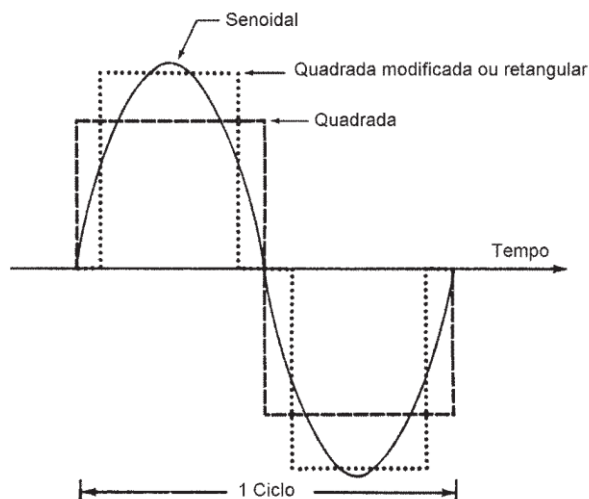


Figura 42 - Formas de onda para diferentes tipos de inversores
Fonte: CRESESB (2004).

- eficiência na conversão

É a relação entre a potência de saída e a potência de entrada. A Figura 43 aponta o fato de que, o cálculo da potência de saída não é tão simples, devido à quantidade de harmônicas existentes. Deve-se sempre usar equipamentos que utilizem o valor eficaz da forma de onda da tensão e da corrente.

A Figura 43 mostra o comportamento da eficiência de um inversor que utiliza técnicas distintas no processo de conversão. A técnica digital apresenta uma eficiência bem superior ao processo convencional, quando o inversor é submetido a porcentagens de carga abaixo da sua potência nominal.

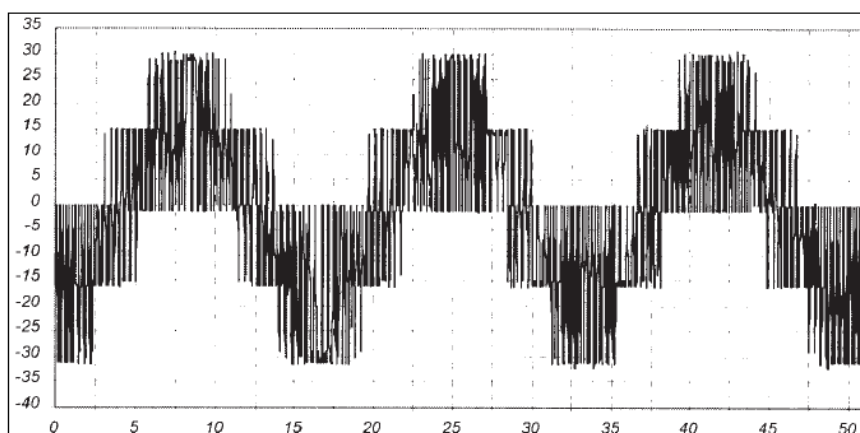


Figura 43 - Tensão (Volts) medida na saída do conversor entre Fase A e o Neutro N1 (2,5 ms/Div)

Fonte: CRESESB (2004).

Quanto ao tipo de onda na saída do inversor, podem-se citar as características abaixo:

- inversor de onda quadrada:
 - fornece uma saída CA com harmônicos elevados e pequena regulação de tensão. A onda quadrada é obtida simplesmente alternando-se a tensão e corrente;
 - para efeitos de comparação, um motor de indução que esteja operando em tensão senoidal da rede elétrica, por exemplo, quando instalado após um destes tipos de inversores, tem somente cerca de 60% do seu torque normal e aquecimentos indesejáveis;
 - tipicamente mais barato, porém, não deve ser usado para cargas indutivas, como motores. Entretanto, é muito adequado para cargas resistivas, tais como lâmpadas incandescentes.

- inversor de onda quadrada modificada ou retangular:
 - é um refinamento dos inversores de onda quadrada. Chaveamentos adicionais são usados para melhor aproximação de uma onda senoidal e, por isso, possui menor distorção harmônica que os de onda quadrada;
 - é adequado para uma maior variedade de cargas, incluindo lâmpadas, equipamentos eletrônicos e a maioria dos motores, embora não consiga operar um motor tão eficientemente quanto um inversor de onda senoidal;
 - é mais adequado para operar motores do que os inversores de onda quadrada, já que o aquecimento do motor é menor. O torque de partida e operação também é melhor, visto que a tensão e corrente de pico são maiores. Entretanto, a tensão de pico deste inversor não deve ser excessiva.

- inversor de onda senoidal
 - é geralmente mais caro; entretanto, se adequadamente projetado e dimensionado, é o que produz uma tensão de saída e desempenho mais adequados;
 - pode operar qualquer aparelho CA ou motor, dentro da sua classificação de potência;
 - utiliza normalmente a técnica PWM com uma filtragem posterior;
 - usado, em geral, para inversores trifásicos.

- PWM
 - possui distorção harmônica muito baixa, principalmente em configurações trifásicas, apesar do aspecto visual da forma de onda;
 - permite a construção de inversores senoidais com filtragem não muito complexa;
 - adequado para quase todas as cargas CA, exceto equipamentos muito sensíveis.

Cabe definir alguns termos necessários no estudo do inversor.

- potência nominal de saída

É a potência que o inversor é capaz de suprir, sendo, em geral, dimensionada em função das cargas a serem atendidas na instalação elétrica, com uma margem de folga de 10 a 20%.

- taxa de utilização

É o tempo em que o inversor poderá operar fornecendo a sua potência de pico.

- tensão de entrada

É dada em função da potência total atendida pelo inversor às cargas CA.

- tensão de saída

É regulada e dimensionada para atender as especificações das cargas.

- capacidade de surto

O inversor é projetado para exceder a sua capacidade nominal, conforme foi dito anteriormente, no tópico que discorre sobre a potência nominal de saída. Certos tipos de carga, como motores de indução, requerem correntes de partida da ordem de 3 a 6 vezes a corrente nominal. Isso deve ser levado em consideração no projeto do inversor.

- regulação de tensão

Indica a variação de amplitude da tensão de saída.

- frequência

Para o sistema elétrico de potência brasileiro, a frequência deve ser regulada para os 60 Hz.

- proteções

A proteção atua sobre a tensão de entrada (CC), para que não exceda o limite máximo. Além disso, há a proteção contra sobrecarga e elevação de temperatura, através de sistemas de controle.

- modularidade

Trata-se do uso de inversores conectados em paralelo, para atenderem a diferentes cargas.

- fator de potência

O inversor deve ter um fator de potência compatível com o das cargas que ele irá atender.

- consumo de potência sem carga

Também chamado autoconsumo ou consumo permanente e representa a potência que o inversor utiliza mesmo sem alimentar cargas.

Além das características mencionadas anteriormente, cabe citar que os conversores do tipo CC-CC, conforme o item 3.2.6.3, podem ser entendidos como controladores de carga, por estabilizarem o nível de tensão, tornando-o adequado para suprir um banco de baterias. Tal função tem por objetivo aumentar a eficiência energética do processo, bem como a vida útil das baterias.

Existem os conversores CC-CC do tipo *boost*, que elevam a tensão e os do tipo *buck*, que reduzem a tensão. Além da aplicação como controlador de carga, o conversor desse tipo pode ser instalado atrás de um conversor CC-CA, para adaptar o nível de tensão gerada no arranjo fotovoltaico com o do inversor (CC-CA).

Outro mecanismo encontrado é o MPPT, que significa seguidor do ponto de máxima potência. O objetivo é regular a tensão e a corrente de saída do arranjo, de forma a obter o máximo produto $I \times V$. Conforme a Figura 44, essa função pode estar associada à sistemas CC ou CA.

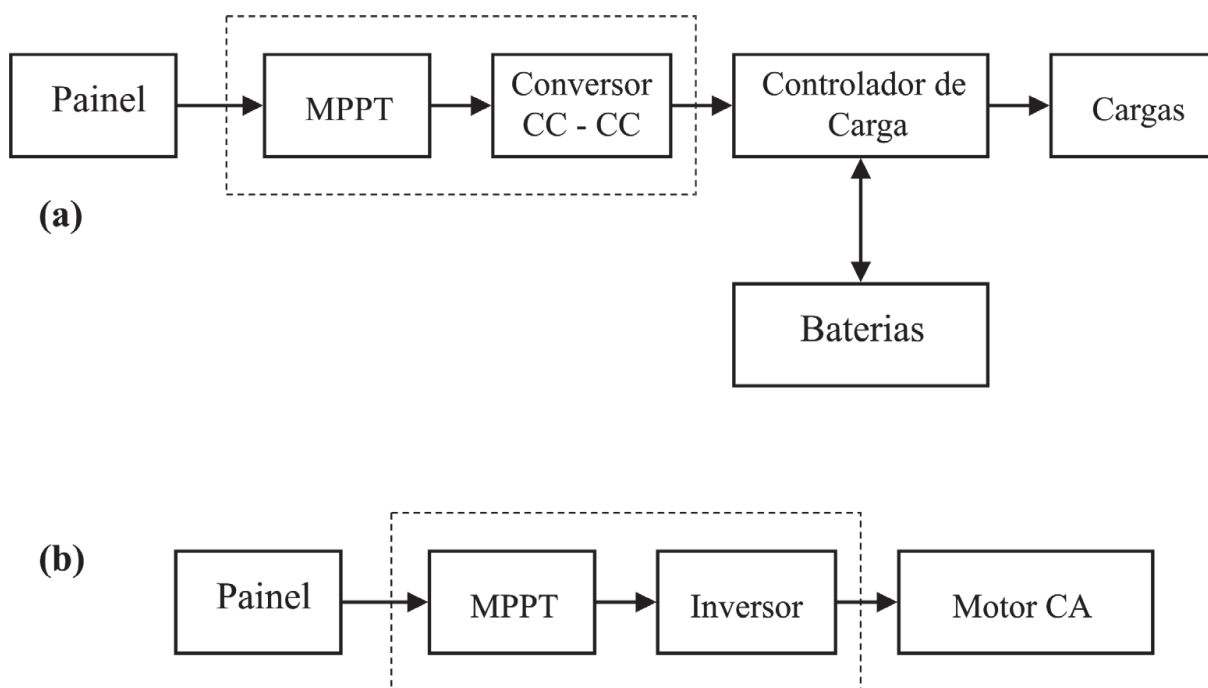


Figura 44 - Aplicação do MPPT para sistema CC e para sistema CA

Fonte: CRESESB (2004).

Como alternativa ao sistema MPPT, têm-se o *Best Fixed Voltage* (BFV), que significa melhor tensão fixa. Nesse caso é estudado um valor fixo para a tensão de operação dos módulos fotovoltaicos, de forma que a potência produzida seja a

máxima possível, ao longo de um período de tempo. Nesse caso, para estipular essa tensão, devem-se levar em conta os seguintes fatores:

- tipo de módulo;
- configuração série-paralelo;
- localização geográfica;
- aspectos climáticos.

As vantagens obtidas são: maior economia, considerando-se que o índice de perdas é de até 5% a mais em relação ao MPPT. A Figura 45 ilustra a perda de potência do método BFV em relação ao método MPPT.

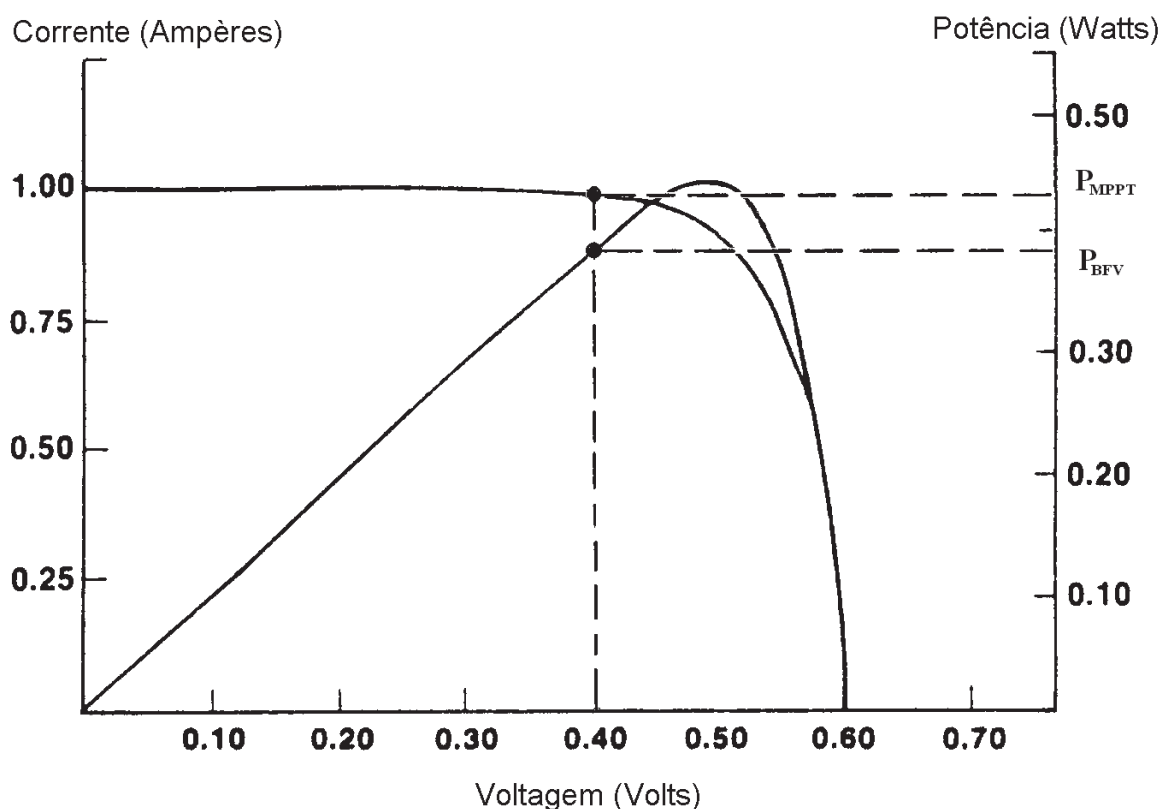


Figura 45 - Perda de potência do BFV em relação ao MPPT para a mesma condição
Fonte: CRESESB (2004).

3.3 PROGRAMAS DE INCENTIVO NO BRASIL

Com o intuito de gerar cada vez mais energia de forma limpa tem-se percebido alguns programas de incentivo a utilização da energia solar fotovoltaica.

Um fato considerável ocorreu em 2008, com a criação do Grupo de Trabalho de Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos (GT-GDSF), no âmbito do MME com o objetivo de elaborar uma proposta de curto, médio e longo prazo, relacionada aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil.

O Grupo setorial de sistemas fotovoltaicos da ABINEE (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica), constituído em janeiro de 2010, tem o propósito de reunir as empresas interessadas no desenvolvimento e inserção da energia solar fotovoltaica no país, em particular os sistemas conectados às redes elétricas públicas (GRUPO SETORIAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ABINEE, 2012). Esse grupo reforça a importância da existência de leilões específicos para a energia solar fotovoltaica, que resultará nos seguintes benefícios:

- aprendizado tecnológico;
- tropicalização da tecnologia;
- inserção e desenvolvimento regional;
- desenvolvimento da cadeia produtiva nacional;
- geração de empregos e renda;
- desenvolvimento de fonte limpa e renovável;
- repercussão positiva globalmente à imagem do Brasil e lideranças políticas.

O mesmo grupo enfatiza que a regulamentação publicada pela ANEEL, através da resolução normativa 482 que criou o sistema de compensação de energia elétrica, não é suficiente para o desenvolvimento da cadeia produtiva nacional. Ressalta, ainda, que a curva de crescimento nacional no setor está muito lenta, ao passo que a curva de aprendizado está altamente acelerada, o que gera um grave atraso que acaba por comprometer a inserção do Brasil neste setor.

3.3.1 Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios

O Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM) teve o objetivo de fornecer assistência energética às comunidades que não são atendidas pela rede convencional, utilizando as fontes de energia renováveis e descentralizadas. A ação do PRODEEM estava direcionada para a implementação do desenvolvimento social, econômico e complementação da oferta de energia.

O programa contemplou principalmente o meio rural, tentando fixar o homem na região e evitando a migração para os centros urbanos. As atividades do PRODEEM foram absorvidas pelo Programa Luz para Todos.

3.3.2 Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

A elaboração do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) é um dos mais importantes programas para o desenvolvimento de fontes alternativas de energia no Brasil. Este programa tem por finalidade a contratação de projetos em energia eólica, biomassa e PCH conectados à rede que sejam implementados por produtores Independentes de Energia controlados ou não por concessionárias de energia (DUTRA, 2007).

O PROINFA foi criado em 26 de abril de 2002 pela publicação da Lei Federal nº 10.438 sendo mais tarde revisada e ajustada através da Lei nº 10.762 (11 de novembro de 2003) e regulamentada através dos Decretos nº 4.541/2002 e nº 5.025/2004. O programa é dividido em duas etapas: a primeira para implementação de projetos em curto prazo e a segunda para implementação em médio prazo.

Este programa tem como objetivo não só o envolvimento de investidores nacionais, mas também investimentos estrangeiros.

3.3.3 Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica (Luz para Todos)

O Programa Luz para Todos visou prover, até o ano de 2010, o acesso à energia elétrica à totalidade da população do meio rural brasileiro. É um projeto ambicioso ao considerar um índice de 80% de excluídos do acesso à energia elétrica, uma população superior a 10 milhões de pessoas (ELETROBRAS, 2012).

Além de levar energia à população rural, promove também soluções para auxiliar no desenvolvimento social e econômico das comunidades de baixa renda, contribuindo assim para a redução da pobreza. O suprimento da demanda do meio rural ocorre por meio de três iniciativas: extensão da rede das concessionárias, sistema de geração descentralizada e geração isolada (ANEEL, 2012b).

Segundo publicação no site oficial do programa, a meta inicial de atender a 10 milhões de pessoas foi alcançada em maio de 2009 e até março de 2012, o programa já chegou para cerca de 14,4 milhões de moradores rurais de todo o país.

Os investimentos chegam a superar os R\$ 20 bilhões, dos quais R\$ 14,5 bilhões são do Governo Federal.

Estima-se também que as obras do programa “Luz para Todos” tenham gerado cerca de 439 mil novos postos de trabalho e utilizado 1 milhão de transformadores e mais de 7,3 milhões de postes, dos quais 13,3 mil foram desenvolvidos com nova tecnologia utilizando resina de poliéster reforçada com fibra de vidro, que facilitou seu transporte pelas estradas e rios, já que por serem mais leves e por flutuarem, dispensam o uso de caminhões, muitas vezes intrafegáveis na Região Amazônica.

Foram empregados também 1,4 milhão de km de cabos elétricos, parte deles subaquáticos para a travessia de rios, vencendo distâncias que antes não poderiam ser alcançadas. Só no estado do Amazonas foram utilizados 28 mil metros de cabos elétricos colocados dentro dos rios.

Além disso, a economia também se beneficia com a instalação da eletricidade no campo. A pesquisa de impacto realizada no ano de 2009 mostrou

que 79,3% dos atendidos pelo Programa adquiriram televisores, 73,3% passaram a ter geladeiras em suas casas e 24,1% compraram bombas d'água, entre outros.

4 GERAÇÃO EÓLICA

Embora nenhuma das fontes de energia renováveis possua, por si, a capacidade de satisfazer 100 % das necessidades de consumo, é a energia eólica uma das que poderá ser aproveitada até ao máximo do seu potencial, pois é uma energia limpa, não causa poluição atmosférica, não produz dióxido de carbono, dióxido de enxofre ou óxidos de azoto responsáveis pelo “efeito de estufa” e pela “chuva ácida” e não produz ou utiliza qualquer material radioativo na geração de energia (CASTRO, 2011).

A geração de energia elétrica ocorre através da conversão da energia cinética do vento em energia mecânica, a qual é convertida em energia elétrica por meio de um gerador.

4.1 EVOLUÇÃO DA ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

Estudos apontam que a energia eólica vem sendo utilizada desde 4000 a.C. em embarcações, onde se utilizava a força do vento como energia para locomoção. Outra utilização se dava para a moagem de grãos e bombeamento de água em atividades agrícolas. A partir da revolução industrial o aproveitamento da energia eólica para esses fins foi substituído por máquinas a vapor.

No inverno de 1887 em Cleveland Charles F. Brush, um dos fundadores da indústria elétrica norte-americana, conseguiu gerar 12 kW de energia elétrica através do vento utilizando um gerador de corrente contínua conforme a Figura 46. Esta foi a primeira turbina usada para geração de energia elétrica.

Com o avanço das redes elétricas no início do século XX, pesquisas para utilização de energia eólica em geração de grandes blocos de energia foi intensificado, e assim em 1976 a primeira turbina eólica comercial foi ligada a rede elétrica pública na Dinamarca (ANEEL, 2012b).

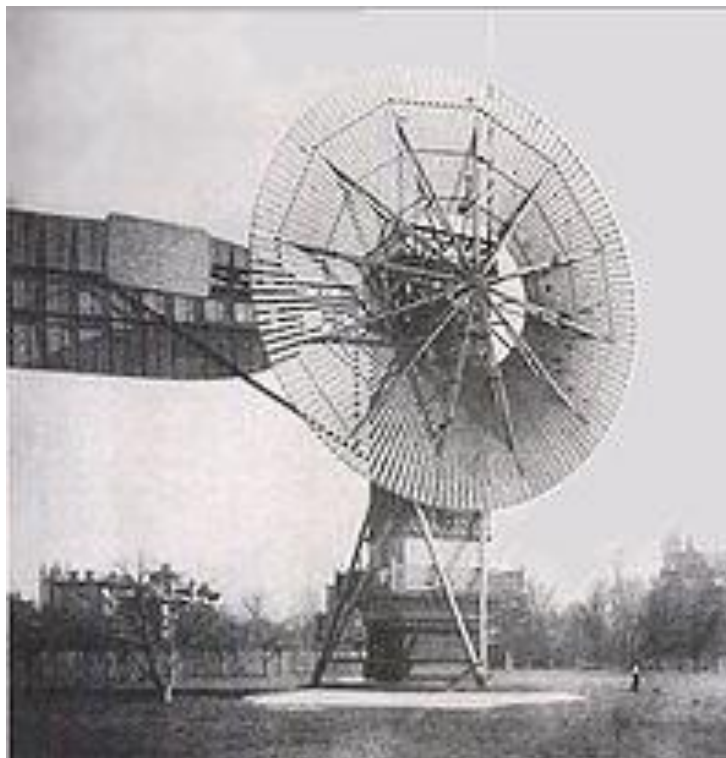


Figura 46 - Turbina eólica de Brush

Fonte: DOGDE (2006).

Segundo Johnson (2006, p. 9) após a segunda guerra mundial com os investimentos em fontes de energia renováveis foram ampliados, e em 1980 a potência das turbinas eólicas já era em média de 50 kW.

No Brasil a primeira turbina eólica de grande porte foi instalada no arquipélago de Fernando de Noronha, em 1992. Dotada de 3 pás com 17 metros de diâmetro e potência de 75 kW. No Brasil, a marca de 1 GW foi alcançada em junho de 2011. Em 2012 a marca já alcançou 1,56 GW. A maioria dos parques eólicos nacionais se encontra nas regiões Nordeste e Sul do país (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2012).

Nas regiões sul e nordeste principalmente, os períodos de menor capacidade dos reservatórios das hidrelétricas coincidem com os períodos de maiores ventos, assim maior geração, conforme a Figura 47. Este fato aumenta a confiabilidade e estabilidade do sistema não apenas da geração eólica, mas sim do sistema elétrico brasileiro.

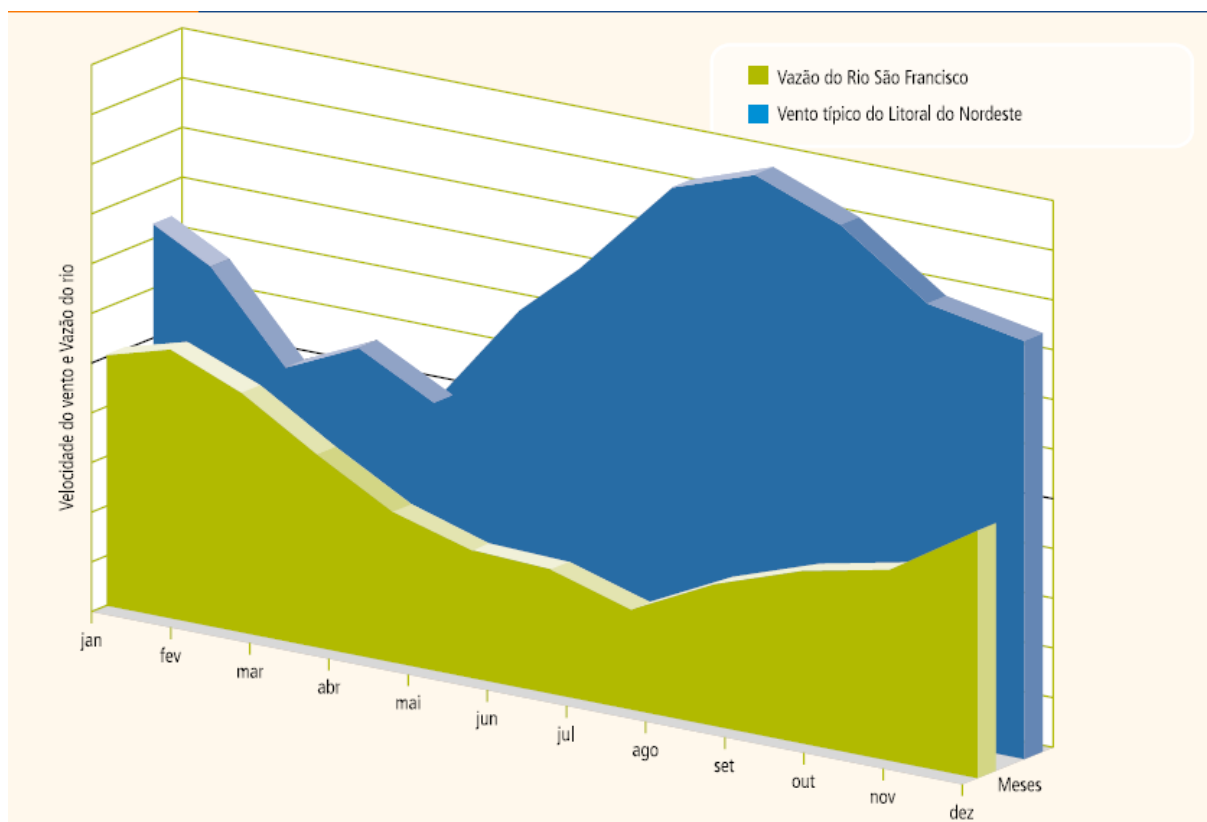


Figura 47 - Complementaridade entre energia elétrica e hidráulica na região nordeste

Fonte: ANEEL (2012b).

4.2 VENTO E CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA

A energia eólica pode ser considerada como uma das formas em que se manifesta a energia proveniente do Sol, fato devido aos ventos serem gerados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera.

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável é necessário que sua densidade seja maior ou igual a 500 W/m^2 , a uma altura de 50 m, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s.

As regiões de possível implantação de geração eólica podem ser divididas em classes, conforme seu potencial eólico. As regiões da classe 1 apresentam pouco ou nenhum interesse para o aproveitamento de energia eólica. Regiões de classe 2 e 3 podem ou não ser favoráveis, dependendo das condições topográficas. Regiões classificadas com a classe 4 apresentam os melhores aproveitamentos de vento, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Definição das classes de energia

| classe | Mata | | Campo Aberto | | Zona Costeira | | Morros | | Montanhas | |
|--------|----------|------------------------|--------------|------------------------|---------------|------------------------|----------|------------------------|-----------|------------------------|
| | Vm (m/s) | Em (W/m ²) | Vm (m/s) | Em (W/m ²) | Vm (m/s) | Em (W/m ²) | Vm (m/s) | Em (W/m ²) | Vm (m/s) | Em (W/m ²) |
| 4 | > 6 | > 200 | > 7 | > 300 | > 8 | > 480 | > 9 | > 700 | > 11 | > 1250 |
| 3 | 4,5 - 6 | 80 - 200 | 6 - 7 | 200 - 300 | 6,5 - 8 | 250 - 480 | 7,5 - 9 | 380 - 700 | 8,5 - 11 | 650 - 1250 |
| 2 | 3 - 4,5 | 25 - 80 | 4,5 - 6 | 80 - 200 | 5 - 6,5 | 100 - 250 | 6 - 7,5 | 200 - 380 | 7 - 8,5 | 300 - 650 |
| 1 | < 3 | < 25 | < 4,5 | < 80 | < 5 | < 100 | < 6 | < 200 | < 7 | < 300 |

Fonte: FEITOSA, E. A. N. et al. *Panorama do Potencial Eólico no Brasil*. 2003.

A potência que uma massa de ventos pode fornecer, considerando que a energia cinética de uma massa de ar m em movimento a uma velocidade v é dada pela equação 24:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (24)$$

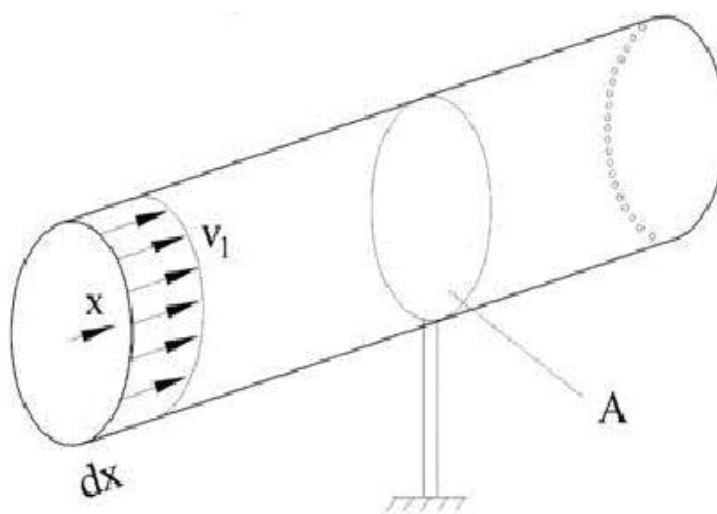


Figura 48 - Fluxo de ar através de uma área transversal A

Fonte: DUTRA, 2009

Considerando a mesma massa de ar em movimento a uma velocidade v , perpendicular a uma sessão transversal de um cilindro imaginário, conforme Figura 48, pode-se demonstrar que a potência disponível no vento que passa pela seção A, transversal ao fluxo de ar, é dada pela equação 25:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (25)$$

onde:

- P - potência do vento (W);
- ρ - massa específica do ar (kg/m^3);
- A - área da seção transversal (m^2);
- v - velocidade do vento (m/s^2).

Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação das pás. A potência disponível no vento não pode ser totalmente aproveitada pela turbina eólica na conversão de energia elétrica. Para se levar conta esta característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência C_p , que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor.

A potência mecânica extraída do vento pela turbina eólica depende de vários fatores. Mas tratando-se de estudos elétricos, o modelo geralmente apresentado nas literaturas é simplificado pelas equações (26) e (27) (PAVINATTO, 2005).

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\alpha, \beta) \quad (26)$$

com:

$$\alpha = \frac{R\omega}{V} \quad (27)$$

onde:

- C_p – coeficiente de potência da turbina eólica;
- α – razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (tip speed ratio);
- ω – velocidade angular do rotor (rad/s);
- R – raio do rotor (m);
- ρ – massa específica do ar (kg/m^3);
- A – área da seção transversal (m^2);
- v – velocidade do vento (m/s^2).

4.3 CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS

Turbinas eólicas podem ser classificadas conforme seu tamanho, uso ou potência, conforme Tabela 8. Quanto ao tamanho podem ser pequenos com potência até 80 kW, geralmente utilizadas para consumo próprio. De médio porte, com potência de 80 kW a 500 kW, para consumo próprio com fornecimento excedente para a rede ou só fornecimento para o sistema. Ou de grande porte com potência gerada superior a 500 kW para fornecimento de energia para a rede.

Tabela 8 - Classificação de turbinas eólicas: Tamanho/Potência/Uso

| Tamanho | Potência | Uso |
|----------------|------------------|--|
| Pequeno | Até 80 kW | Consumo próprio com fornecimento do eventual excedente para a rede |
| Médio | De 80 kW a 500kW | Consumo próprio com fornecimento do excedente para a rede, ou só fornecimento. |
| Grande | Maior que 500 kW | Fornecimento de Energia para a rede |

Fonte: BRITISH WIND ENERGY ASSOCIATION, 2012.

Podem ser classificadas também de acordo com o tamanho, diâmetro e área, conforme a Tabela 9. Turbinas eólicas pequenas apresentam um diâmetro inferior a 16 m e área inferior a 200 m². As de tamanho médio variam de 16 a 45 m de diâmetro e de 200 a 1600 m² de área. As de grande porte apresentam diâmetro superior a 45 m e área maior que 1600 m². Podem também ser diferenciadas construtivamente.

Tabela 9 - Classificação de turbinas eólicas: Tamanho/Diâmetro/Área

| Tamanho | Diâmetro (m) | Área (m²) |
|----------------|---------------------|-----------------------------|
| Pequeno | Até 16 | Até 200 |
| Médio | De 16 a 45 | De 200 a 1600 |
| Grande | Maior que 45 | Maior que 1600 |

Fonte: BRITISH WIND ENERGY ASSOCIATION, 2012.

4.3.1 Rotores de eixo vertical

A maioria das turbinas eólicas destinadas à produção de energia elétrica apresenta de duas ou três hélices laminadas rotativas em torno de um eixo horizontal. Estas hélices tendem a ser caras e a turbina tem que ser orientada para o vento, tarefa complicada para as máquinas maiores. Estes problemas levaram muitos pesquisadores em busca de máquinas mais simples e baratas (JOHNSON, 2006).

Em geral turbinas de eixo vertical não necessitam de mecanismos de acompanhamento de vento, o que torna um rotor mais simples conforme a Figura 49.

Um modelo que obteve destaque é a turbina eólica Darrieus. Tal turbina foi patenteada nos Estados Unidos por G. J. M. Darrieus em 1931 (JOHNSON, 2006).



Figura 49 - Turbina eólica experimental de eixo vertical

Fonte: MERKASOL, 2012.

A Figura 50 apresenta um rotor do tipo Darrieus, que possui como vantagem não requerer nenhum tipo de direcionamento, pois está sempre voltado ao vento. O gerador e os controles encontram-se ao nível do solo e são, portanto de fácil acesso e manutenção. Suas pás são de simples construção conforme Figura 51. Como o rotor fica situado próximo ao solo, a geração de energia é sensivelmente inferior a um gerador de eixo horizontal. O controle desta turbina é difícil e necessita de um motor de partida.



Figura 50 - Rotor Darrieus

Fonte: JOHNSON (2006).

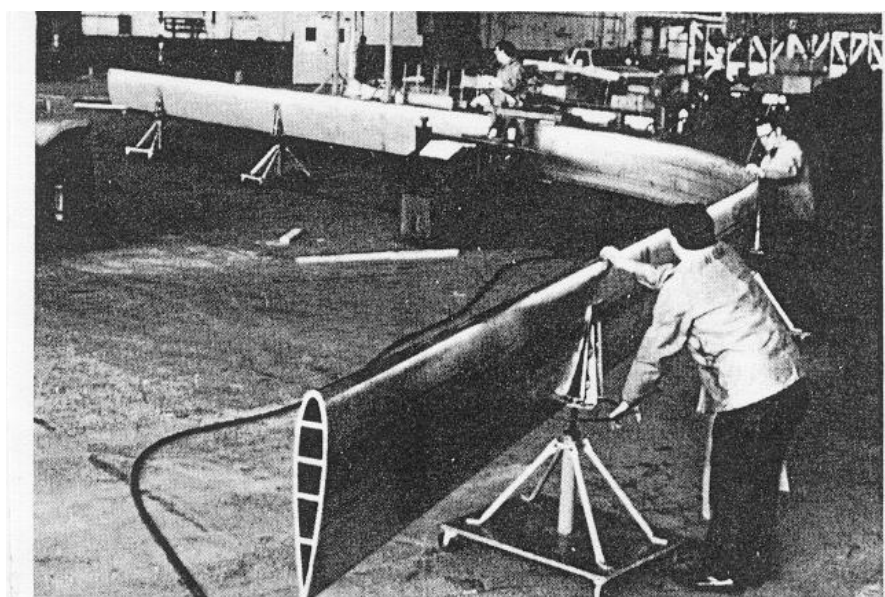


Figura 51 - Pá em processo de modelamento.

Fonte: JOHNSON (2006).

4.3.2 Rotores de eixo horizontal

Dutra (2009, p. 29) descreve:

São os mais comuns, e grande parte da experiência mundial está voltada para a sua utilização. São movidos por forças aerodinâmicas

chamadas de forças de sustentação (*lift*) e forças de arrasto (*drag*). Um corpo que obstrui o movimento do vento sofre a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (forças de sustentação) e de forças que atuam na direção do escoamento (forças de arrasto). Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento. Adicionalmente, as forças de sustentação dependem da geometria do corpo e do ângulo de ataque (formado entre a velocidade relativa do vento e o eixo do corpo).

Os rotores que giram predominantemente sob o efeito de forças de sustentação permitem liberar muito mais potência do que aqueles que giram sob efeito de forças de arrasto, para uma mesma velocidade de vento.

As pás do rotor construtivamente podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais. Em geral, utilizam-se pás rígidas de alumínio ou fibra de vidro reforçada por serem mais leves e eficientes.

Os rotores mais utilizados para geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice, normalmente compostos de 3 pás (ANDERSON, 2009).

4.4 COMPONENTES DA TURBINA EÓLICA

As turbinas eólicas possuem três componentes básicos: o rotor com as pás (Blade), a nacele (Nacelle) e a torre (Tower), conforme a Figura 52.



Figura 52 - Componentes básicos de uma turbina eólica.
Fonte: ANDERSON (2009)

4.4.1 Nacele

Segundo Rugowsky, a nacele abriga os principais componentes de uma turbina eólica, tal como a caixa multiplicadora, o gerador, os eixos e todo o sistema de controle (2009). Está posicionada sobre a torre para aproveitar o melhor posicionamento em relação ao vento. A Figura 53 a seguir mostra a vista do interior da nacele de uma turbina eólica convencional.



Figura 53 - Vista do interior da nacela de uma turbina eólica

Fonte: ANDERSON (2009), adaptado

A Tabela 10 apresenta os componentes da turbina eólica em correspondência a Figura 53.

Tabela 10 - Componentes da turbina eólica

| Indicador | Componente |
|------------------|--------------------------|
| 1 | Pá |
| 2 | Rotor |
| 3 | Passo |
| 4 | Freio |
| 5 | Eixo de baixa velocidade |
| 6 | Caixa Multiplicadora |
| 7 | Gerador |
| 8 | Controladores |
| 9 | Anemômetro |
| 10 | Cata-vento |
| 11 | Nacele |
| 12 | Eixo de alta velocidade |
| 13 | Controlador de Partida |
| 14 | Motor de partida |
| 15 | Torre |

Fonte: Os autores.

4.4.2 Pás, cubo e eixo

As pás são responsáveis pelo aproveitamento do vento e por converter essa energia cinética em trabalho mecânico. Encontradas em alumínio e mais recentemente em fibras de vidro reforçadas com epóxi. São fixadas através de flange ao cubo. Este construído em aço ou liga de alta resistência. O eixo é o responsável pelo acoplamento do cubo ao gerador, fazendo a transferência da energia mecânica da turbina. É construído em aço ou liga metálica de alta resistência.

4.4.3 Caixa Multiplicadora

O movimento de rotação do rotor da turbina é transmitido ao gerador elétrico por meio de uma transmissão mecânica. As turbinas que empregam geradores síncronos podem utilizar a transmissão de acionamento direto, o gerador e o rotor são acoplados no mesmo eixo. Mas a maior parte dos sistemas empregam caixa multiplicadora como a da Figura 54, ou seja, caixas de velocidades com uma relação de multiplicação determinada, para a transmissão de potência mecânica (MONTEANU, 2008).

Portanto, a máquina elétrica irá experimentar um aumento da velocidade de rotação e um torque eletromagnético reduzido.

A velocidade angular dos rotores geralmente varia na faixa de 20 a 150 rpm, devido às restrições de velocidade na ponta da pá. Entretanto, geradores trabalham em rotações até dez vezes mais elevada.



Figura 54 - Caixa Multiplicadora de uma Turbina Eólica

Fonte: NOVAENERGIA (2012)

4.4.4 Gerador

Fitzgerald (1975, p. 131) descreve,

A lei de Faraday descreve quantitativamente a indução de tensões por parte de um campo magnético variável no tempo. A conversão eletromecânica de energia ocorre quando a variação do fluxo é associada ao movimento mecânico. Em máquinas rotativas, são geradas tensões em enrolamentos ou grupos de bobinas, pela rotação mecânica destes enrolamentos em um campo magnético, por um campo magnético girante que atravessa um enrolamento, ou fazendo com que a relutância do circuito magnético varie com a rotação do motor.

Este fluxo concatenado com uma bobina varia ciclicamente, gera uma tensão induzida. Um grupo de bobinas, interligados de modo que todas as tensões nelas geradas contribuam positivamente ao resultado final, é chamado de enrolamento de armadura. Estas bobinas são enroladas sobre um núcleo de ferro, para que o caminho do fluxo através delas possa ser o mais eficiente possível. Devido ao ferro da armadura ser submetida a um fluxo magnético variável, aparecem nele, correntes de Foucault. Para minimizar essas perdas o ferro da armadura é construído de laminas, ou chapas finas como ilustrado na Figura 55. O circuito magnético é completado através dos enrolamentos de campo, ou em máquinas pequenas podem ser usados ímãs permanentes, (FITZGERALD, 1975).



Figura 55 - Núcleo do estator de um gerador de corrente alternada
Fonte: MOTOCORE (2012).

Atualmente, existem várias alternativas de conjuntos moto-geradores, entre eles: geradores de corrente contínua, geradores síncronos, geradores assíncronos, geradores de comutador de corrente alternada.

4.4.5 Torre

De acordo com Rugowsky (2009), as torres são necessárias para sustentar e posicionar o rotor a uma altura conveniente para o seu funcionamento. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo do sistema. Inicialmente, as turbinas utilizavam torres de madeira estaiada ou metal treliçado. Com o uso de geradores com potências cada vez maiores, as naceles passaram a sustentar um peso muito grande, tanto do gerador quanto das pás. Desta forma, para dar maior mobilidade e segurança para sustentar toda a nacela em alturas cada vez maiores, tem-se utilizado torres de metal tubular ou de concreto conforme a Figura 56, que podem ser sustentadas ou não por cabos tensores.



Figura 56 - Torre de concreto

Fonte: RUGOWSKY *et al.* (2009).

4.5 SISTEMA ELÉTRICO DAS TURBINAS EÓLICAS

A estrutura de geração de energia elétrica é composta por eletromagnetismo e subsistemas elétricos. Além do gerador elétrico e de conversores de eletrônica de potência, geralmente há um transformador elétrico para assegurar uma tensão em compatibilidade com a rede. No entanto, a sua configuração depende do tipo de máquina elétrica e na sua interface de rede (HEIER, 2006).

4.5.1 Turbinas eólicas de velocidade constante

Turbinas eólicas de velocidade constante funcionam independentemente da velocidade do vento. A velocidade do rotor da turbina eólica é fixa e determinada pela frequência da rede elétrica e pelo número de pólos, ou seja, são utilizados geradores assíncronos, mais simples e baratos. São tipicamente equipados com

softstarter, como mostra a Figura 57, e banco de capacitores para amenizar as elevadas correntes de partida.

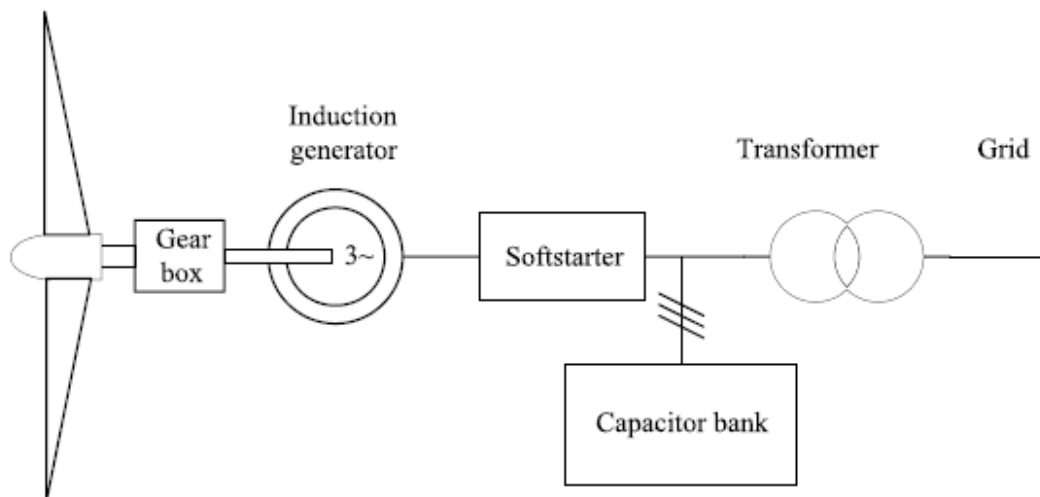


Figura 57 - Esquema elétrico de um gerador com velocidade constante

Fonte: MUNTEANU et al. (2008).

Inicialmente, a máquina de indução está ligada em regime de tal modo que elegera torque eletromagnético na mesma direção com o torque de vento. Em estado estacionário, a velocidade de rotação exceda a velocidade síncrona e o torque eletromagnético é negativo. Isto corresponde à indução de gaiola de esquilo a operação da máquina no modo de geração. Como ele está diretamente conectada à rede, o gerador funciona em sua natural característica mecânica com um declive acentuado (correspondente a um pequeno escorregamento) dada pela resistência do rotor. Portanto, a velocidade de rotação é muito parecida com a velocidade síncrona imposta pela frequência da rede. Além disso, as variações de velocidade do vento vão induzir apenas pequenas variações na velocidade do gerador. (ACKERMANN, 2001).

4.5.2 Turbinas eólicas de velocidade variável

Turbinas eólicas de velocidade variável são atualmente as mais utilizadas no Sistema Elétrico de Potência. A operação com velocidade variável é possível devido à utilização de conversores eletrônicos (MUNTEANU, 2008).

Este tipo de turbina eólica pode utilizar geradores síncronos ou assíncronos. A conexão ao sistema elétrico é feita por meio de um conversor de frequência eletrônico, formado por um conjunto retificador/inversor conforme a Figura 58. Segundo Dutra (2001), “a tensão produzida pelo gerador síncrono é retificada e a corrente contínua resultante é invertida, com o controle da frequência de saída sendo feito eletronicamente através dos tiristores. Como a frequência produzida pelo gerador depende de sua rotação, esta será variável em função da variação da rotação da turbina eólica”.

A frequência fornecida será constante e sincronizada com o sistema elétrico devido ao uso de conversor.

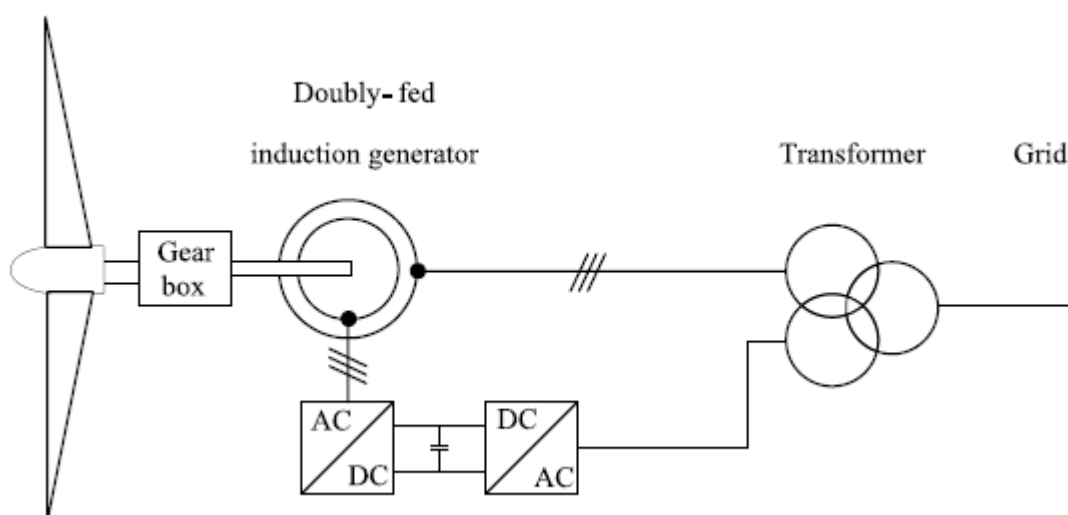


Figura 58 - Esquema elétrico de um gerador com velocidade variável

Fonte: MUNTEANU *et al.* (2008).

Se forem utilizados geradores assíncronos ou de indução, será necessária energia reativa para excitação do gerador, que poderá ser feita através de

capacitores adequadamente dimensionados. Esses capacitores devem estar instalados antes do retificador, pois este isola o sistema não permitindo a passagem de energia reativa.

Segundo Dutra (2001) também poderão ser utilizados geradores assíncronos alimentados por dois enrolamentos de velocidade síncrona diferente. O uso de enrolamento rotórico associado a uma resistência variável, em série, permite o controle da velocidade do gerador pela variação do escorregamento, mantendo a frequência elétrica do gerador no valor definido pelo sistema elétrico ao qual a turbina eólica está conectada.

A ideia básica da turbina eólica com velocidade variável é o desacoplamento da velocidade de rotação e, conseqüentemente, da frequência elétrica da rede. O rotor pode funcionar com velocidade variável ajustada à situação real da velocidade do vento, garantindo um desempenho aerodinâmico maximizado. Uma vantagem é a redução das flutuações de carga mecânica. As desvantagens são os altos esforços de construção e a geração de harmônicos, associados à conversão de frequência, que podem ser reduzidos significativamente com o uso de filtros que, por sua vez, aumentam os custos (CUSTODIO, 2002).

4.6 APLICAÇÕES DE SISTEMAS EÓLICOS

Existem três maneiras distintas de se utilizar um sistema eólico para geração de energia, por meio de sistemas isolados, sistemas híbridos ou interligados à rede.

4.6.1 Sistema Isolado

O sistema isolado é utilizado geralmente, para alimentar pequenas cargas isoladas, porém, necessita estar ligado a um conjunto de baterias para o armazenamento da energia não utilizada e ligado a um sistema de controle que direcione a potência gerada. O controlador tem como objetivo evitar sobrecarga e descarga da bateria evitando, assim, danos irreversíveis. (DUTRA, 2001)

Devido ao fato da tensão gerada não estar devidamente na frequência de uso, ela deve ser retificada conforme Figura 59, e assim com o uso de um inversor ser distribuída para a carga.

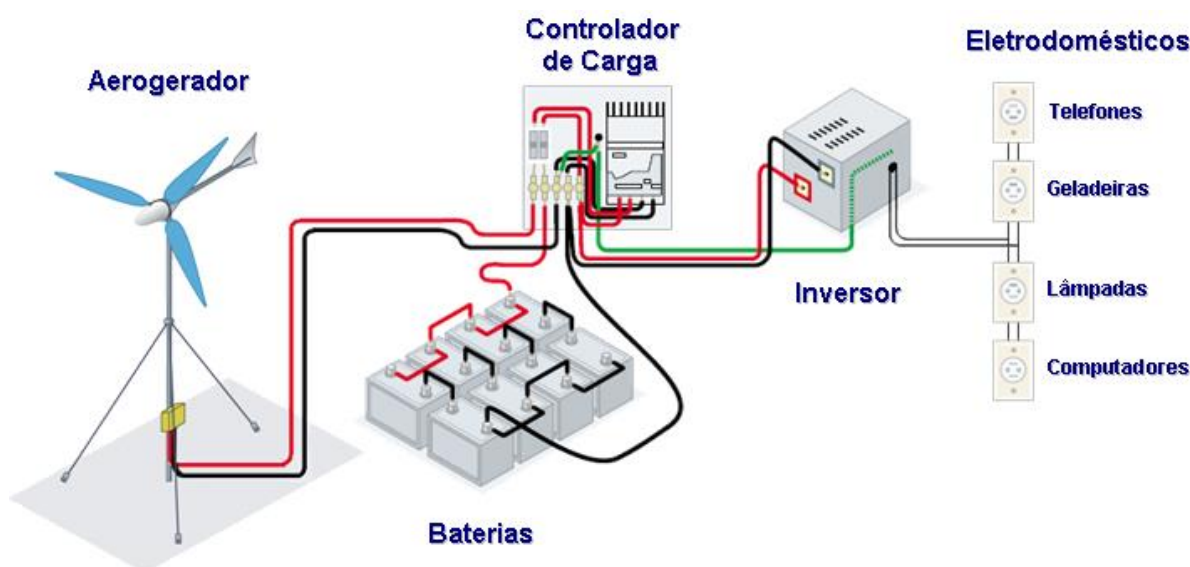


Figura 59 - Sistema de geração eólica isolado

Fonte: DUTRA (2001).

4.6.2 Sistema Híbrido

Abreu (2010, p. 160) considera que apesar dos programas governamentais para universalizar a disponibilidade de energia elétrica, o Brasil ainda tem muitas comunidades isoladas em que não há disponibilidade deste recurso ou energia disponível por tempo suficiente para que ela seja aplicada em outras atividades além da produtiva. Este isolamento se faz, principalmente, devido às condições territoriais. Além deste aspecto, a falta de estrutura produz outro isolamento muito mais danoso, o social. Para promover a inclusão social e o desenvolvimento sustentável alguns requisitos são necessários, dentre eles destaca-se a disponibilização de energia elétrica por períodos maiores que às oito horas do dia comercial e a custo competitivo.

Neste caso apresenta-se como solução a criação de uma pequena central de geração de energia elétrica utilizando o sistema solar fotovoltaico associado com

geradores eólicos com a finalidade principal de promover o desenvolvimento de pequenas localidades agrícolas. Este sistema é denominado sistema híbrido conforme Figura 60. Tal sistema é desconectado da rede convencional que apresenta várias fontes de geração de energia.

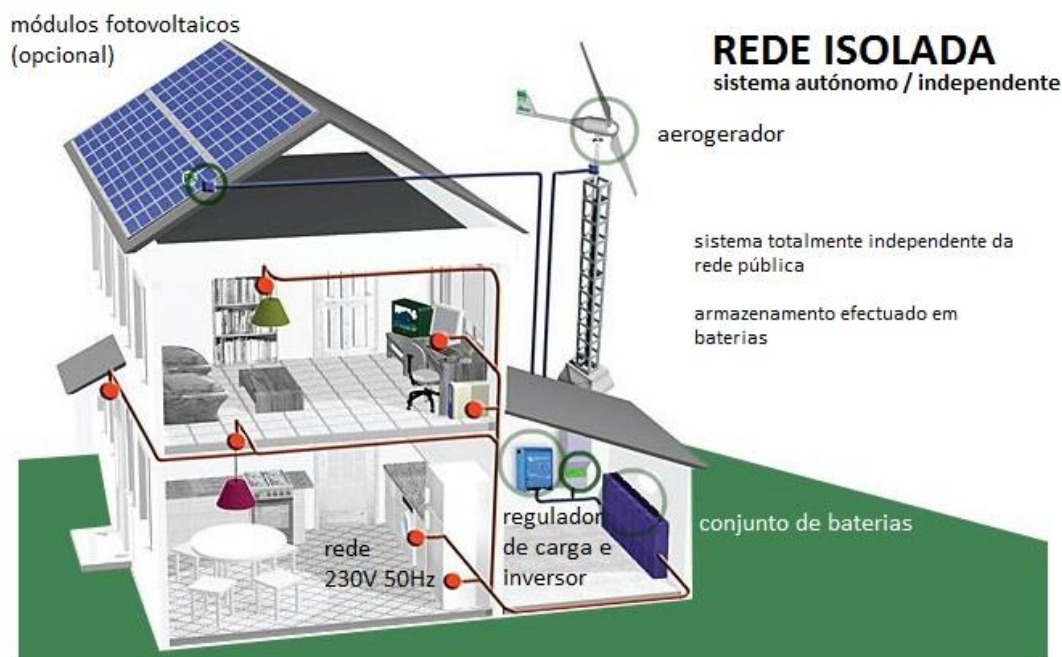


Figura 60 - Configuração de um sistema eólico híbrido

Fonte: MARQUES (2012).

Um exemplo claro desta utilização é a comunidade Boa Esperança que faz parte da Associação de Artesãos e Extrativistas do Povoado da Mumbuca – Associação Capim Dourado, cuja sede está situada no Povoado da Mumbuca, no município de Mateiros-TO. Nesta comunidade foi instalado um sistema híbrido composto por 52 painéis solares da marca KYOCERA com capacidade nominal de 70 Wp e três turbinas eólicas da marca ENERSUD, com capacidade nominal de 1 kW cada como mostra a Figura 61 (ABREU *et al.*, 2010).



Figura 61 - Turbinas eólicas na comunidade Boa Esperança

Fonte: Abreu *et al.* (2012).

4.6.3 Sistema Interligado à rede

O sistema interligado à rede está diretamente ligado ao sistema elétrico de potência. Em 2011, a China apresentou a maior capacidade instalada do mundo, cerca de 18 GW, seguida pelos Estados Unidos com 6,8 GW e Índia com 3 GW conforme a Figura 62.

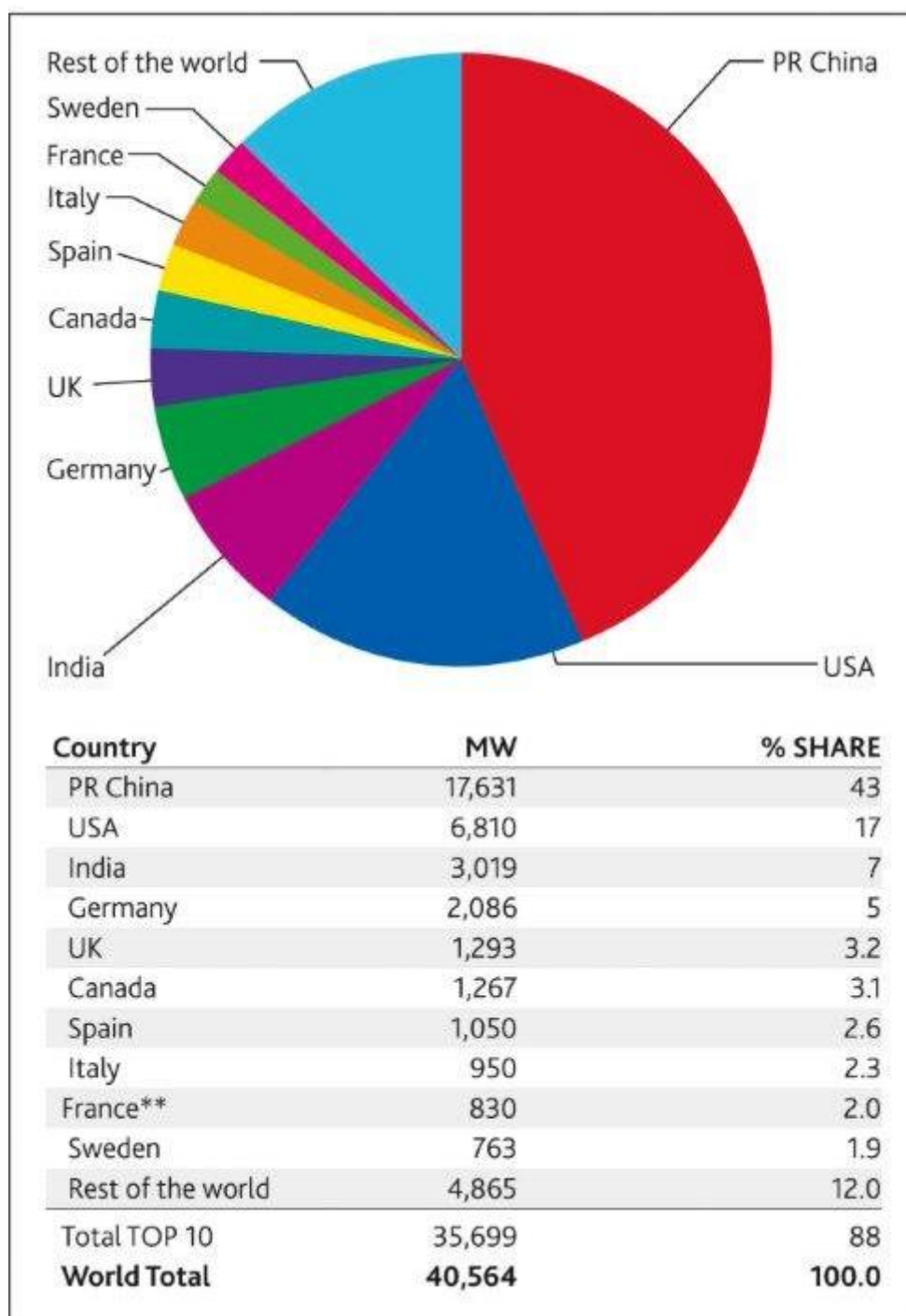


Figura 62 - Capacidade de geração eólica instalada no mundo em 2011

Fonte: GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2012.

A capacidade anual instalada de energia eólica apresentou um aumento significativo, como mostra a Figura 63. Em 2011 atingiu 40,56 MW (Global Wind Energy Council, 2012).

Global Annual Installed Wind Capacity 1996-2011

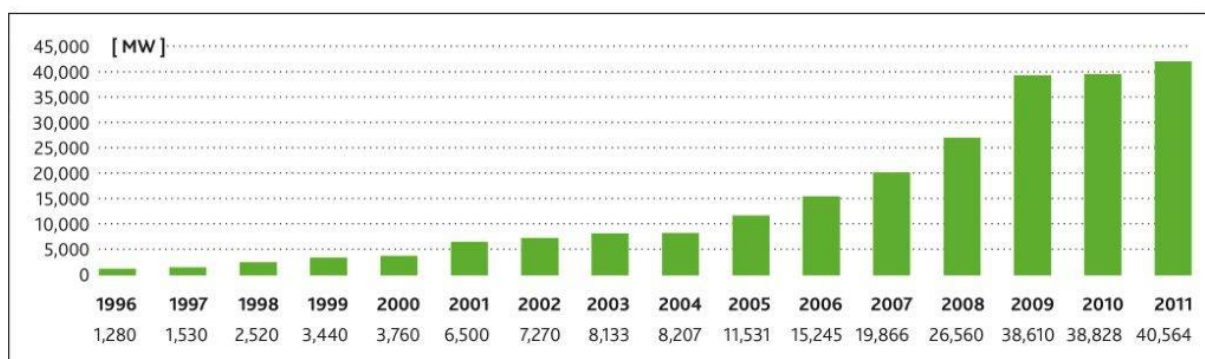


Figura 63 - Capacidade anual instalada

Fonte: GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2012.

O Brasil apresenta uma capacidade instalada de 1,51 GW, cerca de 0,63% da capacidade mundial. A Figura 64 e a Figura 65 apresentam a geração média (MW), fator de capacidade verificado (%), fator de capacidade estimado (%), potência nominal (MW), configuração e início de operação comercial das centrais eólicas das regiões Sul e Nordeste, respectivamente.

| USINAS REGIÃO SUL | GERAÇÃO MÉDIA (MW) | | | FATOR CAPACIDADE VERIFICADO (%) | | | FATOR CAPACIDADE ESTIMADO (%) | POTÊNCIA NOMINAL (MW) | CONFIGURAÇÃO | INÍCIO DE OPERAÇÃO COMERCIAL |
|-------------------|--------------------|------------------|-------|---------------------------------|------------------|-------|-------------------------------|-----------------------|--|------------------------------|
| | 2010 | ÚLTIMOS 12 MESES | 2011 | 2010 | ÚLTIMOS 12 MESES | 2011 | | | | |
| EOL OSÓRIO | 13,32 | 13,46 | 11,31 | 26,64 | 26,92 | 22,62 | 32 | 50 | 25 AEROGERADORES DE 2.000 kW | 29/06/2006 |
| EOL DOS ÍNDIOS | 13,24 | 13,34 | 11,51 | 26,47 | 26,67 | 23,03 | 30 | 50 | 25 AEROGERADORES DE 2.000 kW | 13/12/2006 |
| EOL SANGRAOURO | 14,60 | 14,78 | 12,53 | 29,21 | 29,56 | 25,07 | 33 | 50 | 25 AEROGERADORES DE 2.000 kW | 30/09/2006 |
| EOL CIDREIRA I | - | - | 11,88 | - | - | 16,96 | 32,5 | 70 | 27 AEROGERADORES DE 2.300 kW, 3 AEROGERADORES DE 2.000 kW E 1 AEROGERADOR DE 1.900 kW. | 21/05/2011 |

Figura 64 - Principais Usinas Eólicas da Região Sul

Fonte: ONS, 2011

| USINAS REGIÃO NORDESTE | GERAÇÃO MÉDIA (MW) | | | FATOR CAPACIDADE VERIFICADO (%) | | | FATOR CAPACIDADE ESTIMADO (%) | POTÊNCIA NOMINAL (MW) | CONFIGURAÇÃO | INÍCIO DE OPERAÇÃO COMERCIAL |
|------------------------------|--------------------|------------------------|-------|------------------------------------|------------------------|-------|--|-----------------------------|--|------------------------------------|
| | 2010 | ÚLTIMOS 12 MESES | 2011 | 2010 | ÚLTIMOS 12 MESES | 2011 | | | | |
| EOL RIO DO FOGO | 16,48 | 15,12 | 10,06 | 33,42 | 30,68 | 20,40 | 34 | 49,3 | 61 AEROGERADORES DE 800 Kw E 1 AEROGERADOR DE 500 kW | 15/07/2006 |
| EOL PRAIA FORMOSA | 30,37 | 23,66 | 8,85 | 29,09 | 22,66 | 8,48 | 39 | 104,4 | 50 AEROGERADORES DE 2.088 kW | 26/09/2009 |
| EOL ICARAIZINHO | 25,30 | 20,21 | 8,60 | 46,33 | 37,02 | 15,76 | 43 | 54,6 | 26 AEROGERADORES DE 2.100 kW | 14/10/2009 |
| EOL CANOA QUEBRADA | 19,79 | 16,80 | 9,08 | 34,72 | 29,47 | 15,93 | 43,5 | 57 | 28 AEROGERADORES (22 DE 2.100 kW E 6 DE 1.800 kW) | 26/01/2010 |
| EOL BONS VENTOS | 15,83 | 9,67 | 7,36 | 31,65 | 19,35 | 14,71 | 43,84 | 50 | 24 AEROGERADORES (22 DE 2.100 kW E 2 DE 1.800 kW) | 11/02/2010 |
| EOL ENACEL | 7,09 | 6,03 | 4,30 | 22,50 | 19,15 | 13,66 | 43,54 | 31,5 | 15 AEROGERADORES DE 2.100 kW | 18/03/2010 |
| EOL VOLTA DO RIO | 10,16 | - | 3,78 | 37,25 | - | 8,99 | 47 | 42 | 28 AEROGERADORES DE 1.500 kW | 03/09/2010 |
| EOL PRAIA DO MORGADO | 8,63 | 6,01 | 2,42 | 24,19 | 20,85 | 8,40 | 50 | 28,8 | 19 AEROGERADORES DE 1580 kW | 26/05/2010 |
| EOL ALEGRIA I | - | - | 4,44 | - | - | 8,71 | 32 | 51 | 60 AEROGERADORES DE 850kW | 30/12/2010 |

Figura 65 - Principais Usinas Eólicas da Região Nordeste

Fonte: ONS, 2011

A Figura 66 e a Figura 67 ilustram a Usina Eólica de Sangradouro, responsável pela maior geração média no Sul do país e a Usina Eólica Rio do Fogo responsável pela geração média de 10,06 MW (ONS, 2011).



Figura 66 - Usina Eólica Sangradouro – Osório/RS

Fonte: WOBEN, 2012.



Figura 67 - Usina Eólica Rio do Fogo - Rio do Fogo/RN

Fonte: WOBEN, 2012.

4.7 IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS

É comum utilizar energia eólica para suprir localidades distantes da rede, assim baixando o custo da instalação. Porém turbinas eólicas emitem sons e ruídos que variam conforme o equipamento. Segundo Araujo (2006), as turbinas demúltiplas pás são menos eficientes e mais barulhentas que as turbinas eólicas de hélices de alta velocidade. A fim de evitar transtornos à população vizinha, o nível de ruído das turbinas deve atender às normas padrões estabelecidos pela legislação vigente. Os impactos visuais são decorrentes do agrupamentos de torres e turbinas eólicas.

Outro fator determinante é o local da instalação, o arranjo das torres deve ser estudado para se obter o desempenho máximo por turbina eólica. Outro impacto negativo das centrais eólicas é a possibilidade de interferências eletromagnéticas, que podem causar perturbações nos sistemas de comunicação e transmissão de dados (rádio, televisão etc.) (TAYLOR, 1996). De acordo com este autor, essas interferências variam muito, segundo o local de instalação da usina e suas especificações técnicas, particularmente o material utilizado na fabricação das pás. Outro fator relevante é a interferência em rotas migratórias dos passáros, mas para Rechsteiner (2008), a questão das aves deve ser abordada em cada projeto, e comumente parceiros de ONGs auxiliam na escolha do local apropriado. Segundo o autor, o principal motivo desse tema ser abordado foi a construção do parque eólico Califórnia Altamont Pass como mostra a Figura 68, que foi construído no início dos anos 80 em um caminho de migração de aves.



Figura 68 - A usina de Altamont Pass, na Califórnia

Fonte: LAYTON, 2011.

As principais causas de morte de aves e morcegos são ataques de outros animais, janelas, edifícios altos, carros e aviões. As turbinas eólicas são uma das formas menos significantes, mas em se tratando de um parque eólico o problema pode se agravar. Segundo Soverindo (2009), para reduzir esse efeito, pode ser aplicado diferentes cores na pintura das pás.

O setor de energia eólica deve tentar compensar acidentes envolvendo aves, destinando uma pequena parte da receita de energia eólica para financiar a proteção destes animais, além da proteção de áreas selecionadas e programas de reprodução de espécies ameaçadas de extinção.

5 DIODO EMISSOR DE LUZ

5.1 HISTÓRICO DA ILUMINAÇÃO

O homem sempre buscou soluções para vencer a escuridão. Ao aprender a dominar e conservar o fogo, iniciou a história da iluminação artificial. Desde então, o homem vem utilizando o fogo como fonte de iluminação, imprescindível para a sobrevivência do grupo, considerando as ameaças que poderiam espreitar durante a noite ou em ambientes onde a luz do sol não entrava. Durante muito tempo, a humanidade dependeu basicamente da combustão de combustíveis sólidos ou líquidos para a manutenção do fogo. As primeiras luminárias utilizadas pelo homem constituíam-se de rochas, conchas ou outros materiais naturais os quais eram preenchidos com gordura animal que mantinham o fogo aceso por mais tempo, o pavio destas luminárias era composto de fibras de plantas. As lâmpadas de óleo da Mesopotâmia datam de 8000 a.C. e as velas foram empregadas pela primeira vez no Egito antigo. Por volta do século VII a.C., os gregos começaram a produzir as chamadas lâmpadas “terracota”, representadas pela Figura 69 abaixo, para serem utilizadas em substituição às tochas. Estas lâmpadas eram preenchidas com gordura animal ou óleo e a chama podia durar cerca de três horas (RODRIGUES, 2009).



Figura 69 - Lâmpada "terracota"

Fonte: RODRIGUES (2009).

Os primeiros passos para a invenção da lâmpada elétrica foram dados em 1801 pelo químico inglês Humphry Davy, ao fazer passar corrente elétrica por um fio de platina (COMISSÃO EUROPÉIA, 2012a). Embora diversos cientistas tenham contribuído para tal descoberta desde o início do século XIX, foi o norte-americano Thomas Edison quem criou as lâmpadas elétricas incandescentes.

Ele ‘descobriu’ a lâmpada incandescente do jeito que ela é hoje, ou seja, com a possibilidade de ser produzida em escala comercial; os que descobriram a incandescência como forma de luz artificial antes dele montaram produtos artesanais que não tinham essas características que ficaram universalmente conhecidas e que varou dois séculos – Mauri Luizda Silva, professor de iluminação artificial da escola Denise Goldman, consultor luminotécnico e autor dos livros Iluminação – Simplificando o Projeto e Luz, lâmpadas & Iluminação (GOEKING, 2009).

Manter o filamento incandescente durante a transmissão da corrente elétrica era um grande desafio a ser superado. Para isso, era preciso encontrar um material ideal.

Thomas Alva Edison, inventor e empresário que registrou 2.332 patentes em seu nome, baseado num experimento de 1860 do físico e químico Joseph Swan, desenvolveu a lâmpada incandescente (GOEKING, 2009).

Edison tentou mais de 6.000 materiais de filamentos alternativos durante dois anos e gastou US\$40,000 conduzindo mais de 1.200 testes. Depois de testar as substâncias em todo o mundo, Edison concluiu que a platina era efetiva. No entanto, ela era dispendiosa e proporcionava somente eficiência limitada como um filamento prático. Finalmente, Edison tentou a linha de coser de algodão carbonizado da máquina de costura. Na tarde de Domingo, 19 de outubro de 1879, Edison e seus assistentes equiparam este filamento de algodão e fizeram voltas observando-o pelo relógio. Mais de 40 horas mais tarde o filamento ainda estava incandescente e Edison reconheceu que tinha resolvido o problema. A invenção do bulbo da luz elétrica foi anunciada no New York Herald em 21 de dezembro de 1879. Nas semanas seguintes os estoques de gás caíram drasticamente enquanto as ações da Edison Electric Company subiam, batendo finalmente \$3,500 uma ação. Os bulbos de luz entraram para venda em 1880 e enquanto a introdução de escala-total do sistema de iluminação Edison era feito em Londres no *Holburn Viaduct* no início de 1882, a era da iluminação elétrica de maneira geral através uma fonte de força municipal centralizada iniciou em 4 de setembro de 1882, em *Pearl Street Station*, na Cidade de Nova York (GE ILUMINAÇÃO, 2012).

No início do século XX, a empresa húngara Tungstram desenvolveu a lâmpada elétrica com o filamento de tungstênio permitindo que as lâmpadas

funcionassem em temperaturas mais elevadas, emitindo, portanto, uma luz mais branca e mais intensa com o mesmo consumo de energia. Desde então, este filamento vem sendo utilizado nas lâmpadas incandescentes (COMISSÃO EUROPEIA, 2012b).

As lâmpadas elétricas incandescentes acabaram substituindo os lampiões a gás, os quais eram bastante perigosos, poluentes e apresentavam uma luminosidade relativamente limitada. Além disso, abriu caminho para o desenvolvimento da indústria de geração e distribuição de eletricidade, que surgiu inicialmente para fornecer a energia necessária à iluminação elétrica.

A partir do século XX observa-se um grande desenvolvimento da tecnologia da iluminação com o aparecimento de diversos tipos de lâmpadas: o vapor de mercúrio; vapor de sódio à baixa pressão; de neon, fluorescentes, incandescentes halógenas; a vapor de sódio em alta pressão e vapores metálicos (ROIZENBLATT, 2009). Mais recentemente, uma nova tecnologia vem se mostrando bastante promissora para substituir as lâmpadas incandescentes, sendo mais eficientes e versáteis, os LEDs, que serão tratados a partir do capítulo 5.3.

5.2 CONCEITOS DE LUMINOTÉCNICA

5.2.1 Luz

Aspecto de energia radiante que um observador humano constata pela sensação visual, determinado pelo estímulo da retina ocular (CREDER, 1983).

5.2.2 Candela

Corresponde à intensidade luminosa, na direção perpendicular a uma superfície plana de área igual a $1/600.000 \text{ m}^2$, de um corpo negro, à temperatura de

solidificação da platina (1.773°C), sob pressão de 101.325 N/m² (1 atm) (MOREIRA, 1999).

5.2.3 Definição de lúmen

Lúmen é a quantidade de luz irradiada através de uma abertura de 1 m², por uma fonte de intensidade de uma vela, em todas as direções, localizada no centro de uma esfera de 1 m de raio (CREDER, 1983).

Como em cada metro quadrado de superfície desta esfera temos o fluxo de 1 lúmen e sendo a área da esfera determinada pela equação 28:

$$A_{esf} = 4\pi r^2 \quad (28)$$

O fluxo total de toda a superfície será de 12,56 lúmens. Então, o fluxo total produzido por uma fonte cuja intensidade média esférica é de uma vela, é de 12,56 lúmens. Assim o lúmen também pode ser definido como o “fluxo luminoso emitido segundo um ângulo sólido de 1 esferorradiano, por uma fonte puntiforme de intensidade invariável de mesmo valor em todas as direções e igual a 1 candela” (CREDER, 1983).

5.2.4 Índice de Reprodução de Cor

O Índice de Reprodução de Cor (IRC) é calculado comparando-se a luz artificial com a luz natural do Sol. O índice é obtido calculando a curva espectral e definindo o IRC de cada produto em laboratório de fabricantes ou de órgãos especializados (GOEKING, 2009).

Seus valores variam de 0 a 100, sendo que, quanto mais próximo de 100, melhor o IRC. A Tabela 11 apresenta a classificação do IRC. A Figura 70 ilustra um IRC de 40%, enquanto a Figura 71 mostra um IRC de 100%.



Figura 70 - IRC no valor de 40%
Fonte: Lumicenter (2012).



Figura 71 - IRC no valor de 100%
Fonte: Lumicenter (2012).

Tabela 11 - Índice de reprodução de cores (IRC)

| Nível | Classificação | Reprodução | Aplicações |
|--------------|-------------------------------------|------------------------|---|
| 1 | 1a: 90 <IRC< 100 1b: 80 <IRC< 90 | Excelente Muito boa | Testes de cor, floricultura, lojas, shoppings, residências. |
| 2 | 2a: 70 <IRC< 80 2b: 60 <IRC< 70 | Boa Razoável | Escritórios, ginásios, fábricas, oficinas. |
| 3 | 40 <IRC< 60 | Regular | Depósitos, postos de gasolina, pátios. |
| 4 | 20 <IRC< 40 | Insuficiente | Ruas, canteiros de obras, estacionamentos. |

Fonte: MOREIRA (1999), pg.22 (adaptação).

5.2.5 Temperatura de cor

Aquecendo-se um corpo negro no fogo ele vai tomando cor avermelhada e quanto mais calor se colocar nele, este avermelhado vai alaranjando, amarelando, branqueando até ficar no branco azulado, quando o corpo negro estiver em ponto de fusão, ou seja, em altíssima temperatura (GOEKING, 2009).

Temperatura de cor é uma escala que exprime a qualidade da cor e o conteúdo de uma fonte de luz. Esta escala é calibrada em Kelvin.

A cor percebida depende da temperatura de cor das fontes de iluminação que iluminam a cena observada. Quanto mais elevada é a temperatura de cor de uma luz, maior percentagem de azuis terá. As luzes de baixa temperatura, pelo contrário terão uma alta percentagem de radiações vermelhas. A Tabela 12 apresenta alguns dados de fontes luminosas com seus respectivos valores de temperatura de cor e IRC (UFSC, 2012).

Tabela 12 - Temperatura de cor e IRC

| Fonte Luminosa | K | IRC |
|-----------------------------------|----------------|-----|
| Natural Céu claro | 7.500 - 19.000 | 100 |
| Céu claro ensolarado | 5.000 | 100 |
| Céu encoberto | 7.000 | 100 |
| Incandescente 500 W 2.850 97 | 2.850 | 97 |
| Halógena | 3.000 | 89 |
| Fluorescente Branca fria 4.350 67 | 4.350 | 67 |
| Branca quente | 3.100 | 55 |
| Mercúrio Clara | 5.900 | 22 |
| Branca "Deluxe" | 4.000 | 43 |
| Vapor Metálico Clara | 5.200 | 55 |
| Revestida | 4.600 | 75 |
| Sódio Alta-Pressão | 2.250 | 25 |

Fonte: UFSC (2012).

5.2.6 Fluxo luminoso

Fluxo luminoso (ϕ) é a grandeza característica de fluxo energético, exprimindo sua aptidão de produzir uma sensação luminosa no ser humano através do estímulo da retina ocular, avaliada segundo os valores da eficácia luminosa relativa admitidos pela Comissão Internacional C.I.E (MOREIRA, 1999).

Abrange os comprimentos de onda compreendidos entre 380 a 780 nm.

De acordo com Creder (1983), o fluxo total de um ambiente pode ser determinado utilizando as equações 29 e 30:

$$\phi = \frac{SE}{ud} \quad (29)$$

$$\phi = \eta\varphi \quad (30)$$

onde:

ϕ = fluxo luminoso total, em lumens;

S = área do recinto, em metros quadrados;

E = nível de iluminação, em luxes;

u = fator de utilização ou coeficiente de utilização;

d = fator de depreciação ou de manutenção;

η = número de luminárias;

φ = fluxo por luminárias, em lumens.

5.2.7 Intensidade luminosa

De acordo com Moreira (1999), intensidade luminosa é o limite da relação entre o fluxo luminoso em um ângulo sólido em torno de uma direção dada e o valor desse ângulo sólido, quando esse ângulo sólido tende para zero.

A unidade de intensidade luminosa no SI é a candela (cd). A equação 31 e a Figura 72 representam este conceito:

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} \quad (31)$$

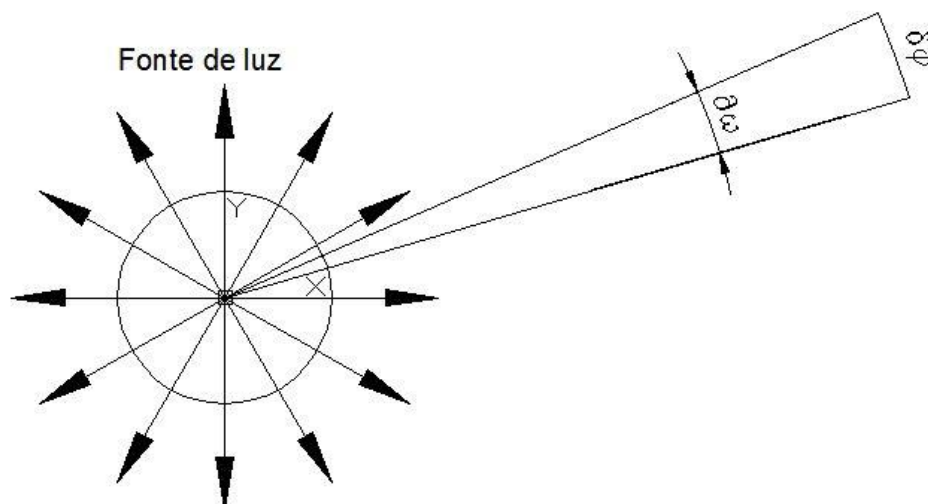


Figura 72 - Intensidade luminosa

Fonte: MOREIRA (1999), pg. 12 (adaptação).

5.2.8 Curva de distribuição de intensidade luminosa

Ao serem conectadas as extremidades de todos os vetores de intensidade luminosa sobre um plano onde a luz incide, obtemos a curva de distribuição de intensidade luminosa, conforme Figura 73 (OSRAM, 2012).

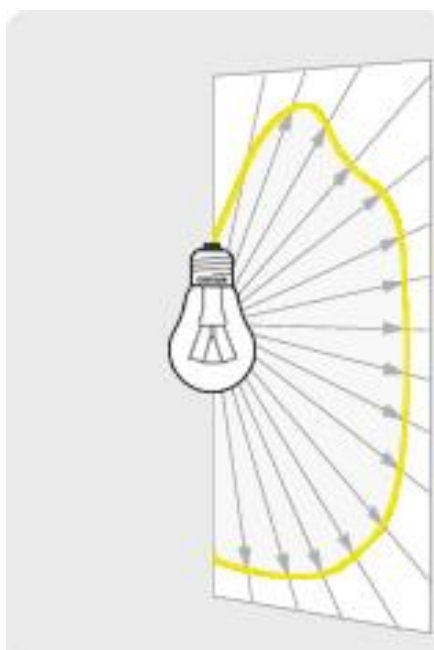


Figura 73 - Curva de distribuição de intensidade luminosa

Fonte: OSRAM (2012).

5.2.9 Luminância

A luminância (L) tem como unidade de medida cd/m^2 (candela por metro quadrado) e refere-se à intensidade luminosa produzida ou refletida por uma superfície aparente. Indica a intensidade luminosa de uma fonte de luz ou de uma superfície iluminada, referida à sua área observada. Para os seres humanos, a luz não é visível até que a radiação entre no olho. Luminância é a única variável que pode ser percebida por seres humanos.

Sua definição, conforme representa a equação 32, é o limite da relação entre a intensidade luminosa com a qual irradia, em uma direção determinada, uma superfície elementar contendo um ponto dado e a área aparente dessa superfície para uma direção considerada com o valor dessa área tendendo para zero (MOREIRA, 1999).

$$I = \frac{dl}{dS_A} \quad (32)$$

A Tabela 13 apresenta a luminância média de algumas fontes luminosas.

Tabela 13 - Luminância média

| Fonte de luz | Luminância média [cd/m ²] |
|--|---|
| Sol do meio-dia | 1,6 • 10 ⁹ |
| Lâmpada Xênon de Arco Curto | 1,5 • 10 ⁸ - 2,7 • 10 ⁹ |
| Lâmpada de iodeto metálico de curto arco HMI, HTI | 5 • 10 ⁷ - 1 • 10 ⁸ |
| Lâmpadas de iodeto metálico HQI | 5,3 • 10 ⁶ |
| Lâmpadas incandescentes Claras | 2 • 10 ⁶ - 2 • 10 ⁷ |
| Lâmpadas incandescentes Foscas | 5 • 10 ⁴ - 4 • 10 ⁵ |
| Lâmpada de Vapor de sódio de baixa pressão | 7,5 • 10 ⁴ |
| Lâmpada fluorescente / Lâmpada fluorescente compacta | 1,2 • 10 ⁴ - 1,4 • 10 ⁴ |
| Nuvem branca iluminada | 1 • 10 ⁴ |
| Vela | 7.500 |
| Céu limpo | 3.000 - 5.000 |
| Lua Cheia | 2.500 |
| Lâmpada de descarga | 200 - 600 |
| Céu Noturno | 0,001 |

Fonte: adaptado de OSRAM (2012).

5.2.10 Iluminância

A iluminância trata-se da razão entre o fluxo luminoso e a área a ser iluminada, independentemente da reflectância da superfície. Uma iluminância de 1 lux ocorre quando um fluxo luminoso de 1 lm cai de maneira uniforme sobre uma área de 1 m². Iluminância diminui com o quadrado da distância entre a fonte de luz e a superfície. É definida, portanto, como “a densidade superficial de fluxo luminoso recebido” representada pela equação 33 e pela Figura 74 (MOREIRA, 1999).

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad (33)$$

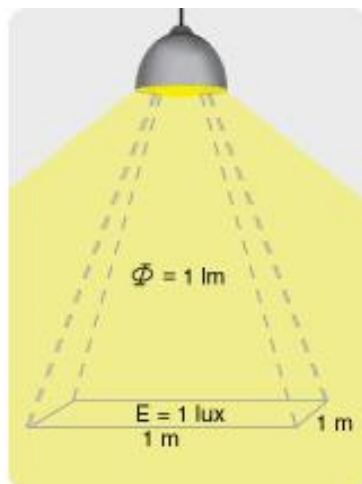


Figura 74 - Iluminância

Fonte: OSRAM (20120).

Iluminância é um valor fácil de calcular. Luminância, por outro lado, depende das propriedades de reflexão e da refletância dos materiais iluminados e estas variáveis não são muitas vezes conhecidas.

5.2.11 Coeficiente de utilização

O coeficiente de utilização relaciona o fluxo luminoso total emitido e o fluxo útil, recebido no plano de trabalho. Depende das dimensões do local, das refletâncias do teto e das paredes e do acabamento das luminárias (CREDER, 1983).

5.2.12 Fator de depreciação

O fator de depreciação, também chamado de fator de manutenção, relaciona o fluxo emitido no fim do período de manutenção da luminária e o fluxo luminoso inicial da mesma. Quanto melhor em manutenção (limpeza e substituição mais frequentes) mais alto será este índice, porém mais dispendioso (CREDER, 1983).

5.2.13 Eficiência Luminosa

Trata da relação entre o fluxo luminoso total emitido pela fonte e a potência por ela absorvida. É um indicador de eficiência utilizado para avaliar o rendimento da conversão de energia em luz por uma determinada fonte luminosa (CREDER, 1983).

5.3 HISTÓRICO DO LED

A sigla LED é originada do termo em inglês *Light Emitting Diode* que significa Diodo Emissor de Luz. Trata-se de um semicondutor que emite radiação sob a forma de luz quando submetido a uma corrente elétrica (GOEKING, 2009).

A Note on Carborundum.

To the Editors of Electrical World:

SIRS:—During an investigation of the unsymmetrical passage of current through a contact of carborundum and other substances a curious phenomenon was noted. On applying a potential of 10 volts between two points on a crystal of carborundum, the crystal gave out a yellowish light. Only one or two specimens could be found which gave a bright glow on such a low voltage, but with 110 volts a large number could be found to glow. In some crystals only edges gave the light and others gave instead of a yellow light green, orange or blue. In all cases tested the glow appears to come from the negative pole, a bright blue-green spark appearing at the positive pole. In a single crystal, if contact is made near the center with the negative pole, and the positive pole is put in contact at any other place, only one section of the crystal will glow and that the same section wherever the positive pole is placed.

There seems to be some connection between the above effect and the e.m.f. produced by a junction of carborundum and another conductor when heated by a direct or alternating current; but the connection may be only secondary as an obvious explanation of the e.m.f. effect is the thermoelectric one. The writer would be glad of references to any published account of an investigation of this or any allied phenomena.

NEW YORK, N. Y.

H. J. ROUND.

Figura 75 - Primeira observação do fenômeno de eletroluminescência em um diodo
 Fonte: LIGHTEMITTINGDIODES (2012).

A Figura 75 mostra a publicação de um relatório sobre um fenômeno curioso, a saber, a primeira observação de eletroluminescência de um diodo de SiC (*carborundum*). O artigo indica que o primeiro LED foi um diodo Schottky, em vez de um diodo junção PN. Foi escrito por HJ Round, *Electrical World* 49, 1907 (LIGHTEMITTINGDIODES, 2012).

O primeiro LED comercial surgiu em 1962 e foi desenvolvido por um engenheiro da General Electric – Nick Holoniak Jr. e produzido unicamente na cor vermelha. Alguns anos mais tarde foram lançados nas cores verde e amarelo (SOLELUX, 2012).

Diodos e transistores, cujos elementos básicos são o silício e o germânio, têm a maior parte da energia liberada na forma de calor, sendo insignificante a luz emitida (em razão da opacidade do material) (REVISTA LUMIERE, 2007, p. 43).

Nos anos 80, com o avanço da tecnologia, os fabricantes desenvolveram LEDs de coloração vermelha e âmbar, atingindo elevados níveis de intensidade luminosa, passando a ser utilizada na indústria automotiva para sinalização e, também, para iluminação. Na década de 90 estudiosos desenvolveram a tecnologia InGaN, possibilitando obter as cores azul, verde e ciano para o LED. Através dessas descobertas abriu-se a possibilidade de combinar as cores primárias para cobrir todo o espectro de cores e inclusive a cor branca. As tecnologias usadas anteriormente, limitavam os LEDs a níveis de intensidade luminosa de 4.000 a 8.000 milicandelas, com ângulos de abertura para feixes luminosos de 8 a 30 graus. Ao final da década de 90 surgiram os primeiros LEDs de brilho mais elevado obtendo-se de 30 a 40 lumens e podendo atingir ângulos com abertura de 110 graus para feixes luminosos.

Anteriormente, a tecnologia LED era utilizada somente para fins de sinalização em equipamentos, mas no ano de 1999 atingiu o segmento de iluminação. Desde então, o setor vem sendo revolucionado, prometendo economia, durabilidade e eco-eficiência de uma forma jamais vista. As aplicações possíveis englobam desde a iluminação pública até painéis de publicidade, passando por iluminação de área comercial e mesmo residencial (NOVICKI; MARTINEZ, 2008).

Os LEDs são amplamente utilizados como indicadores luminosos e em telefones celulares, computadores, receptores de televisão, jogos, *display* de informações, lanternas, sinalização, iluminação automotiva, semáforos, iluminação arquitetural, iluminação de fundo de *displays* cristal líquido. LEDs ultravioletas são úteis em aplicações tais como a purificação da água, esterilização cirúrgica e de equipamentos, descontaminação de pessoal e comunicações secretas "fora da linha de visão" (NLOS). Os LEDs são também úteis para a detecção de agentes químicos e biológicos, muitos dos quais se tornam fluorescentes a comprimentos de onda particulares quando expostos à luz ultravioleta. Diodos a laser encontram amplo uso no armazenamento de dados ópticos de alta densidade, tais como sistemas de DVD players; sistemas de comunicação de longa distância por fibras ópticas; e digitalização, leitura e sistemas de impressão em cores de alta resolução. Eles

também servem como eficientes fontes ópticas para amplificadores de fibras ópticas de lasers de estado sólido. Por uma conveniência particular, elas podem ser facilmente moduladas através do controle da corrente injetada.

Nos últimos anos, vem surgindo novas tecnologias LEDs que prometem revolucionar a sua utilização, trazendo maior eficiência e novas possibilidades de utilização, como por exemplo os OLEDs, PLEDs e as LampLEDs (SALEH; TEICH, 2007).

5.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O LED é um dispositivo eletrônico semicondutor, formado por uma junção PN que, quando polarizado diretamente, realiza a recombinação de elétrons e lacunas na sua estrutura. Através desta recombinação, a energia armazenada pelos elétrons é liberada na forma de calor ou luz visível devido à passagem de uma corrente elétrica pelo material, processo denominado eletroluminescência (GOEKING, 2007).

A luz pode ser emitida a partir de um material semicondutor, como um resultado de recombinação elétron-lacuna. No entanto, os materiais capazes de emitir tal luz não brilham a temperatura ambiente, porque as concentrações de elétrons termicamente excitados e lacunas são muito pequenos para produzir radiação discernível. Por outro lado, uma fonte externa de energia pode ser utilizada para produzir pares elétron-lacuna em números suficientes de tal forma que eles produzam grandes quantidades de radiação de recombinação espontaneamente, causando o brilho ou luminescência do material (SALEH; TEICH, 2007).

5.5 MATERIAIS E ESTRUTURAS DE DISPOSITIVOS

A estrutura básica de um LED, conforme Figura 76 é uma pastilha semicondutora sobre uma superfície refletora em forma de concha, envolvida por uma resina que direciona o feixe luminoso (NOVICKI; MARTINEZ, 2008).

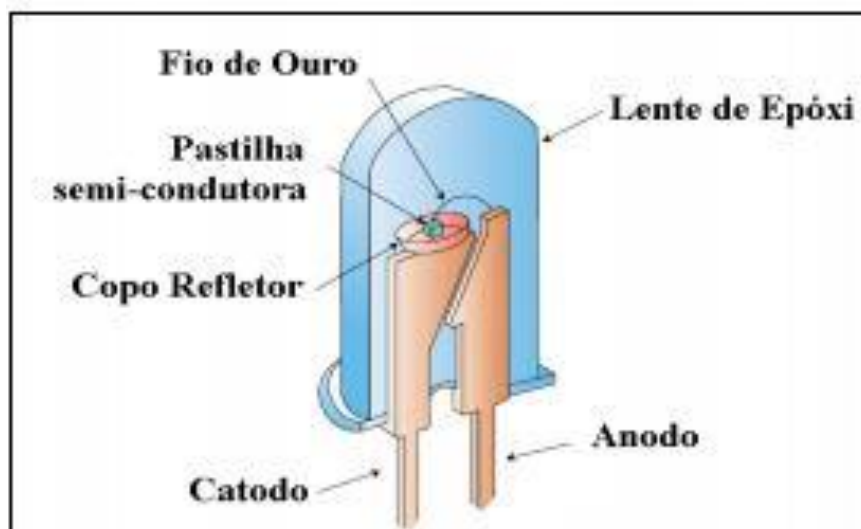


Figura 76 - Estrutura do LED

Fonte: NOVICKI; MARTINEZ (2008).

Os LEDs são frequentemente encapsulados em lentes transparentes de epóxi para vários propósitos. Lentes de diferentes formas alteram o padrão de emissão de diferentes maneiras, tal como ilustrado esquematicamente para lentes hemisférica e parabólica na Figura 77. Lentes de epóxi também podem melhorar a eficiência. A forma da lente pode, então, ser adaptada de modo a maximizar a extração de luz na interface ar-epóxi. Materiais epóxi geralmente têm índices de refração que são intermediários entre aqueles de semicondutores e ar e, na prática, rendem um fator de 2-3 aumento na extração de luz (SALEH; TEICH, 2007).

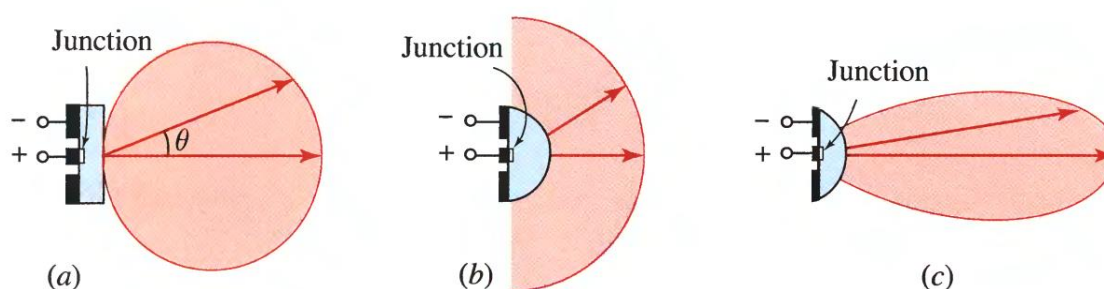


Figura 77 - Padrão de radiação de superfície de LEDs

(a) padrão espacial Lambertiano, na ausência de lente, (b) o padrão espacial com lente hemisférica, (c) o padrão espacial com lente.

Fonte: SALEH; TEICH (2007).

A fotônica foi revolucionada em 1950 com o surgimento de semicondutores cristal-único binário III-V e compostos que não ocorrem na natureza. Muitas destas ligas rendem valores altos de eficiência quântica interna. Fontes de fótons fabricados a partir de materiais III-V, também, oferecem uma longa vida útil, ao contrário daqueles que fazem uso de ligas II-VI. Em 1962, GaAs foi o primeiro material a ser fabricado sob a forma de um diodo emissor de luz. A indústria do LED hoje é construída em torno de materiais ternários e quaternários III-V, particularmente InGaAsP, AlInGaP e AlInGaN.

Outra família que tem atraído o interesse da indústria são os nitretos semicondutores que se enquadram nos chamados semicondutores de “*gap*” largo. Além do seu alto *gap* os nitretos apresentam alta ionicidade, ligações químicas muito curtas, baixa compressibilidade, boa estabilidade térmica e são inertes a ataques químicos e de radiação. Além de não representarem risco ao meio-ambiente (SALEH; TEICH, 2007).

5.6 LED DE LUZ BRANCA

Combinações apropriadas de vermelho, verde e azul são percebidas como brancos. Duas abordagens principais são usadas para a geração de luz branca a partir de LEDs. LEDs azuis e próximos a ultravioleta fabricados a partir de materiais III-nitretos podem ser usados para iluminar o fósforo, o que gera, então, várias outras cores através de fotoluminescência, apresentado na Figura 78. Alternativamente, a luz gerada por LEDs de diferentes composições podem ser combinadas para produzir luz de várias cores. A Figura 79 apresenta as cores que compõe a luz branca. Os LEDs estão substituindo lâmpadas incandescentes nas casas e locais de trabalho, e estão cada vez mais sendo usados em espaços de arquitetura. O LED é superior à lâmpada incandescente, em virtude de sua maior eficiência energética, eficácia luminosa, maior durabilidade, menor custo e configuração compacta (SALEH; TEICH, 2007).



Figura 78 - Emissão de luz branca a partir de uma LED azul III-nitreto contendo fósforo

Fonte: SALEH; TEICH (2007).



Figura 79 - Cores que compõe a luz branca

Fonte: NOVICKI; MARTINEZ (2008).

5.7 LED ORGÂNICO

Diodos orgânicos emissores de luz, em inglês *Organic Light Emitting Diodes* (OLED), podem ser fabricados a partir de pequenas moléculas orgânicas ou cadeias de polímeros conjugados. Matrizes pixelizadas de LEDs orgânicos podem ser fabricadas sob a forma de finas folhas de plástico que emitem luz difusa sobre grandes áreas. Estes LEDs podem formar *displays* de alta eficiência, flexíveis e enroláveis e com luminosidade própria. Estes dispositivos podem ser usados em câmeras digitais, telefones celulares, monitores de computador, receptores de televisão, bem como na iluminação arquitetônica. Eles são menos complexos e mais finos do que telas de cristal líquido (LCDs), as quais requerem iluminação de fundo.

De fato, diodos orgânicos emissores de luz podem servir como fonte de iluminação para LCDs. Os chamados OLEDs, são geradores eficientes de eletroluminescência no vermelho, verde e azul. Dois finos (≈ 100 nm) filmes orgânicos semicondutores são justapostos para formar uma heteroestrutura orgânica. Esta estrutura é impressada entre dois eletrodos inorgânicos, um ânodo que injeta lacunas e um ou mais cátodos que injetam elétrons. Os transportadores injetados são transportados para a heterojunção (região ativa), formando excitons ligados que geram emissão espontânea sobre a recombinação. Heteroestruturas de materiais diferentes produzem diferentes comprimentos de onda, logo utilizando varias heteroestruturas, é possível obter um OLED multicolor. Diodos orgânicos emissores de luz branca, em inglês *White Organic Light Emitting Diodes* (WOLEDs), fabricados desta forma, chegam próximo da unidade em eficiência e apresentam equilibrada reprodução de cores.

Cálcio e óxido de índio e estanho são comumente usados como cátodo e transparentes materiais de ânodo, respectivamente. Semicondutores orgânicos utilizados para fabricar OLEDs incluem transportador de lacuna TPD (trifenil-diamina derivado) e transportador de elétrons Alq3 (alumínio tris [8-hidroxiquinolina]). Dopantes luminescentes podem ser infundidos nas regiões ativas para melhorar a eficiência quântica interna e para criar luz branca.

Diodos poliméricos emissores de luz, em inglês *Polimeric Light Emitting Diodes* (PLEDs), são semelhantes em construção aos OLEDs. O PPV (polifenilenovinileno) é muitas vezes usado para fazer PLEDs. Estes dispositivos são geralmente mais fáceis de fabricar, e têm uma maior eficiência do que os OLEDs, mas eles oferecem um leque mais limitado de cores (SALEH; TEICH, 2007).

5.8 LEDS APLICADOS À ILUMINAÇÃO

Apesar dos diversos aparelhos em que os LEDs vêm ganhando presença, acredita-se que o verdadeiro triunfo desta tecnologia seja em outro setor: a iluminação. Por muito tempo os cientistas vêm pesquisando e trabalhando em diversos projetos para inovar e criar uma lâmpada que funcione por meio de LEDs.

Até o presente momento, já existem algumas lâmpadas e luminárias que funcionam através de LEDs e, aliás, funcionam muito bem. Contudo, o grande problema não está na adaptação, ou na demora da tecnologia ser suficiente para prover uma boa iluminação, porém, o problema consiste no elevado preço que é cobrado por essas lâmpadas. (TECMUNDO, 2012)

As luminárias LED são compostas por conjuntos de LEDs alimentados por um *driver*, geralmente multitensão, que controla o nível de potência dos LEDs. O *driver* é um circuito controlador que mantém constante a potência entregue aos LEDs considerando a mudança de propriedades elétricas durante as variações de temperatura no LED. Sem o driver correto, o LED pode tornar-se muito quente e tornar-se instável, causando mau desempenho ou falha.

A curva de referência I/V dos LEDs é crítica, ou seja, mesmo uma pequena variação na tensão direta se transferida para o LED, causa uma forte variação de brilho. Como a corrente depende da tensão, as variações de tensão refletem-se no brilho dos LEDs de forma indesejável. Assim, a melhor maneira de se controlar o brilho é mantendo um controle preciso da corrente circulante pelos LEDs (SABERELETRONICA, 2008).

As atuais LED *lights* (lâmpadas de LED) proporcionam uma iluminação excelente e o melhor, funcionam em várias cores. Algumas empresas, como a Philips, vêm fabricando produtos desse tipo em larga escala, entretanto, ainda não há um público definido para tais lâmpadas (TECMUNDO, 2012).

Graças ao aperfeiçoamento das fontes de luz, dentro das residências, a maioria das lâmpadas possui base E-14 e E-27 e para estes tipos, o mercado já disponibiliza lampLEDs. Além da substituição das lâmpadas convencionais, as lampLEDs podem ser utilizadas em ambientes que até então as outras lâmpadas não eram capazes de iluminar, por estarem presentes em espaços reduzidos ou de difícil acesso. A Figura 80 traz a definição das principais tecnologias disponíveis no mercado (FREITAS, 2011).

Definição das principais tecnologias disponíveis no mercado:



LampLED: tecnologia eletrônica com qualidade de luz que cria ambientação com economia de energia e maior vida útil.



Fluorescente: economiza energia em relação às Incandescentes, tem maior durabilidade e permite reprodução de luz branca e amarela.



Incandescente: possui tecnologia com filamento e é a mais antiga das lâmpadas usadas para iluminação geral. Emite mais calor do que luz.

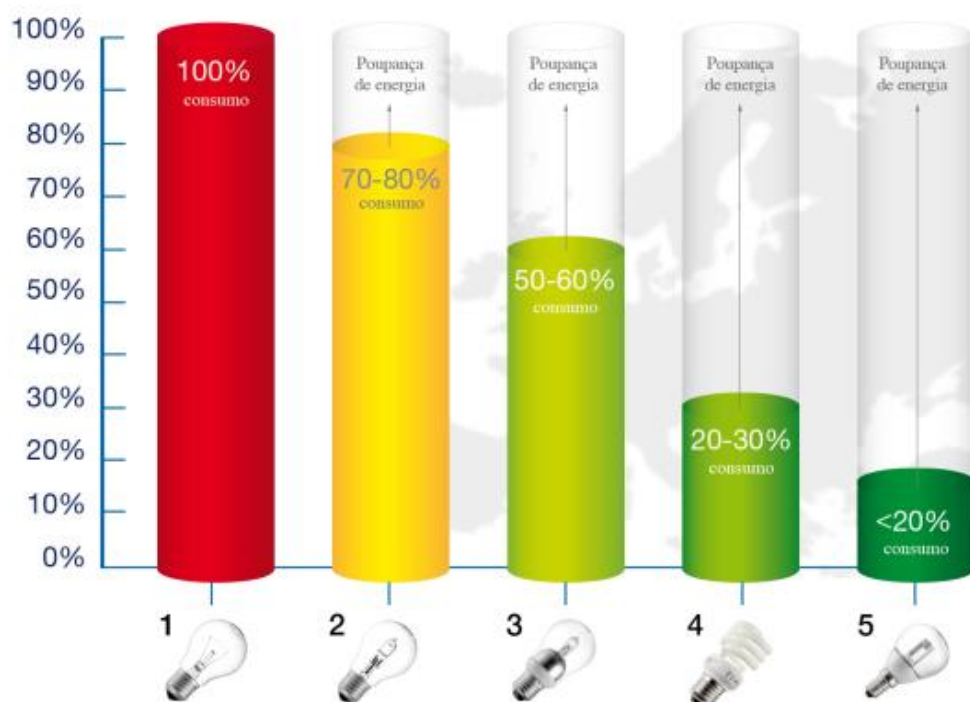
Figura 80 - Principais tecnologias disponíveis no mercado

Fonte: FREITAS (2011).

No Anexo A, é apresentada uma tabela de substituição das lâmpadas convencionais por lâmpadas LED Philips com fluxo luminoso equivalente.

5.9 CARACTERÍSTICAS DAS LÂMPADAS LED

A Figura 81 mostra um gráfico comparando a economia de energia em relação ao consumo na utilização das principais tecnologias de iluminação disponíveis.



- 1: Lâmpadas incandescentes tradicionais
 2: Lâmpadas incandescentes melhoradas (class C da Classificação energética, lâmpada de halógeno enchida com gás xénon)
 3: Lâmpadas incandescentes melhoradas (class B da Classificação energética, lâmpada de halógeno com revestimento infravermelho)
 4: Lâmpadas fluorescentes compactas (LFC)
 5: Díodos emissores de luz (LED)

Fonte: Comissão Europeia 2009

Figura 81 - Economia de energia versus consumo das lâmpadas

Fonte: COMISSÃO EUROPEIA (2009).

5.9.1 Vantagens

- face ao seu rendimento e baixo consumo, o LED vem se tornando um produto ideal para empresas e lugares que buscam economia, tem como tônica a sustentabilidade e o conceito ecológico. A iluminação sustentável compreende aspectos relacionados à utilização racional dos recursos energéticos (SOLELUX, 2012);

- maior vida útil: dependendo da aplicação, a vida útil do equipamento é longa, sem necessidade de troca. Considera-se como vida útil uma manutenção mínima de luz igual a 70%, após 50.000 horas de uso (UNICAMP, 2012);
- custos de manutenção reduzidos: em função de sua longa vida útil, a manutenção é bem menor, representando menores custos (UNICAMP, 2012);
- eficiência: apresentam maior eficiência que as Lâmpadas incandescentes e halógenas e, hoje, muito próximo da eficiência das fluorescentes (em torno de 50 lumens / Watt), tendendo a aumentar no futuro (UNICAMP, 2012);
- baixa tensão de operação: não representa perigo para o instalador (UNICAMP, 2012);
- resistência a impactos e vibrações: utiliza tecnologia de estado sólido, portanto, sem filamentos, vidros, etc., aumentando a sua robustez (UNICAMP, 2012);
- não tem materiais pesados como mercúrio, não poluindo o meio ambiente no descarte (SOLELUX, 2012);
- alta Eficiência em ambiente frio (SOLELUX, 2012);
- controle dinâmico da cor: com a utilização adequada, pode-se obter um espectro variado de cores, incluindo várias tonalidades de branco, permitindo um ajuste perfeito da temperatura de cor desejada (UNICAMP, 2012);
- acionamento instantâneo: tem acionamento instantâneo, mesmo quando está operando em temperaturas baixas (UNICAMP, 2012);
- controle de Intensidade variável: seu fluxo luminoso é variável em função da variação da corrente elétrica aplicada a ele, possibilitando, com isto, um ajuste preciso da intensidade de luz da luminária (UNICAMP, 2012);
- cores vivas e saturadas sem filtros: emite comprimento de onda monocromático, que significa emissão de luz na cor certa, tornando-a mais viva e saturada. Os LEDs coloridos dispensam a utilização de filtros que causam perda de intensidade e provocam uma alteração na cor, principalmente em luminárias externas, em função da ação da radiação ultravioleta do sol (UNICAMP, 2012);

- luz direta, aumento da eficiência do sistema: apesar de ainda não ser a fonte luminosa mais eficiente, pode-se obter luminárias com alta eficiência, em função da possibilidade de direcionamento da luz emitida pelo LED (UNICAMP, 2012);
- ausência de ultravioleta: não emitem radiação ultravioleta sendo ideais para aplicações onde este tipo de radiação é indesejada. Ex.: quadros, obras de arte (UNICAMP, 2012);
- ausência de infravermelho: também não emitem radiação infravermelha, fazendo com que o feixe luminoso seja frio (UNICAMP, 2012);
- com tecnologia adequada PWM, é possível a dimerização entre 0% e 100% de sua intensidade, e utilizando-se Controladores Colormix Microprocessados, obtém-se novas cores, oriundas das misturas das cores básicas, que são: branco, azul, verde, amarelo, vermelho (UNICAMP, 2012);
- ao contrário das lâmpadas fluorescentes que tem um maior desgaste da sua vida útil no momento em que são ligadas, nos LEDs é possível o acendimento e apagamento rapidamente possibilitando o efeito estroboscópico, sem detrimento da vida útil (UNICAMP, 2012);
- com o uso de lentes o fecho pode ser direcionado, aumentando a eficiência (SOLELUX,2012);
- graças ao seu tamanho o LED gera novos conceitos de iluminação (SOLELUX, 2012).

5.9.2 Desvantagens

Os benefícios dos LEDs são inegáveis: no entanto, nem sempre o LED será a melhor opção de fonte de luz, e, em muitos casos, apesar de sua aplicação, o ambiente pode precisar, ainda, de uma fonte de luz mais tradicional. Fatores como fluxo luminoso, IRC, temperatura de cor e térmica, entre outros, devem ser considerados para definir a viabilidade da aplicação de LED, pois um projeto de

iluminação não pode e não deve ser pautado apenas com o apelo de economia de energia (FREITAS, 2011). As desvantagens do uso do LED são: (FREITAS, 2011)

- custo elevado;
- por se tratar de um componente eletrônico, temperaturas elevadas fazem com que a vida útil do LED seja reduzida;
- distribuição luminosa. Os LEDs emitem luz direcional, podendo ser inadequados para sistemas que necessitem de luz em 360 graus;
- quanto maior o índice de reprodução de cores (IRC), maior o custo;
- liberam energia na forma de calor: sua temperatura elevará caso o dissipador embutido na lâmpada seja indevido;
- ainda não existe uma normalização brasileira que permita uma classificação correta do produto e das fontes de alimentação.

No capítulo seguinte será iniciada a etapa de medições no EV. Será estudado o comportamento da moto bomba, que é a carga suprida pelo SFI, arranjo em 12 V. As medições das iluminâncias por ambiente possibilitarão o estudo luminotécnico comparativo entre a tecnologia LED e fluorescente. Além disso, a energia suprida pelo SFCR, a energia consumida pela instalação do EV, além da energia entregue ao bloco V, serão alguns dos aspectos que possibilitarão estudar a eficiência energética do EV.

6 ESTUDO DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA DO ESCRITÓRIO VERDE

6.1 ESTUDO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO

6.1.1 Apresentação

O Escritório Verde possui um Sistema Fotovoltaico Isolado, composto por 10 módulos fotovoltaicos de potência máxima igual a 87 W, logo a potência instalada de pico é de 870 W. Os módulos são da marca KYOCERA, modelo KC85T, conforme os dados de placa mostrados na Figura 82. O material utilizado nos módulos é o silício policristalino, com uma eficiência de conversão fotovoltaica na faixa de 16%.

O SFI aparece na parte direita da Figura 83, ao passo que a parte esquerda corresponde ao Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.

O SFI é dividido em dois subsistemas, de tensão 12 e 24 V. O subsistema de 12 V é composto por dois módulos fotovoltaicos ligados em paralelo, enquanto que o subsistema de 24 V é composto por oito módulos fotovoltaicos ligados em série dois a dois e, então, conectados em paralelo. A Figura 84 apresenta o esquema de ligação dos módulos. Os módulos de 1 a 8 constituem o arranjo em 24 V, ao passo que os módulos 9 e 10 formam o arranjo em 12 V.

O subsistema de 24 V possui o controlador de carga que gerencia a transferência de energia dos módulos fotovoltaicos para o banco composto por 16 baterias, interligadas duas a duas em série e, então, conectadas em paralelo. A Figura 85 ilustra o esquema de ligação do banco de baterias conectado ao subsistema de 24 V.

O subsistema de 12 V, também possui um controlador de carga, e destina-se a alimentar um banco composto de 14 baterias, interligadas em paralelo. A Figura 86 ilustra o esquema de ligação do banco de baterias conectado ao subsistema de 12 V.

As baterias utilizadas nos subsistemas de 12 e 24 V são do tipo chumbo-ácido, marca PIONEIRO e modelo PE 12065, conforme a Figura 87, possuindo uma capacidade de 65 Ah em regime de descarga de 20 horas.



Figura 82 - Módulo fotovoltaico KYOCERA

Fonte: Os autores.

O subsistema de 12 V será objeto do presente estudo, por possuir como carga uma moto bomba, da marca Shurflo, modelo 8000, conforme a Figura 88. Esta moto bomba opera em regime CC e possui nos seus dados de placa: tensão de 12 V, corrente igual a 7 A, e potência igual a 84 W. A moto bomba é responsável pelo recalque da água da chuva, que é armazenada na cisterna e impulsionada até a caixa d'água.

As Figuras 89 e 90 apresentam diagramas unifilares do SFI, arranjos de 12 e 24 V, respectivamente.



Figura 83 - Sistema fotovoltaico isolado do EV

Fonte: Os autores.

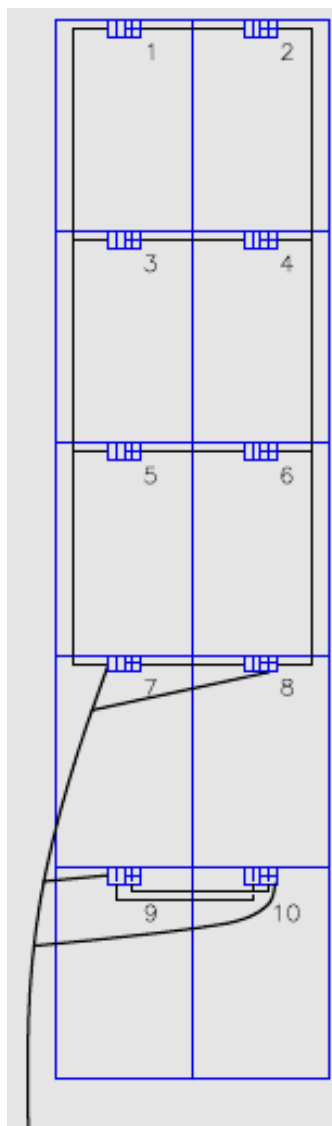


Figura 84 - Esquema de ligação dos módulos do SFI

Fonte: Os autores.

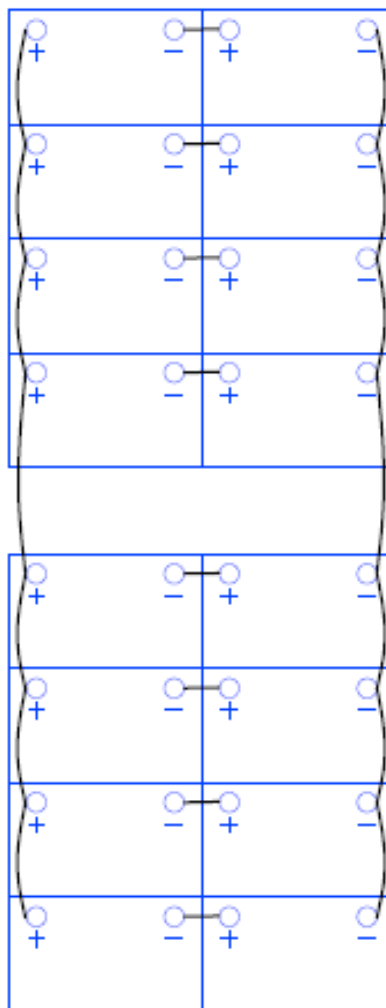


Figura 85 - Esquema de ligação do banco de baterias em 24 V

Fonte: Os autores.

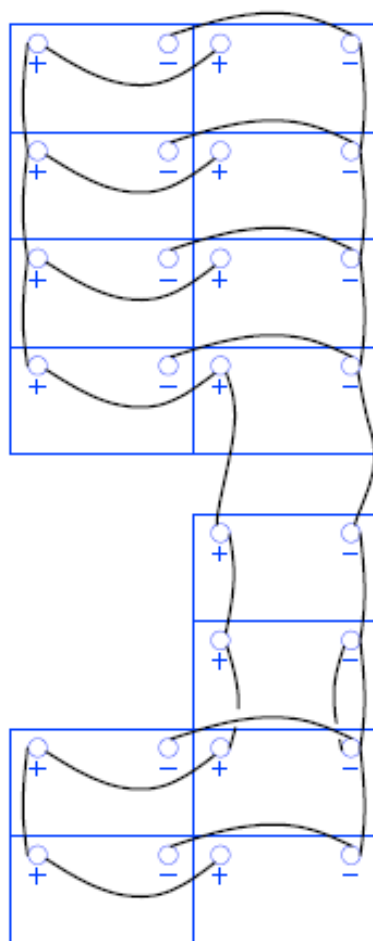


Figura 86 - Esquema de ligação do banco de baterias em 12 V
Fonte: Os autores.



Figura 87 - Bateria que compõe o banco de baterias do SFI

Fonte: Os autores.

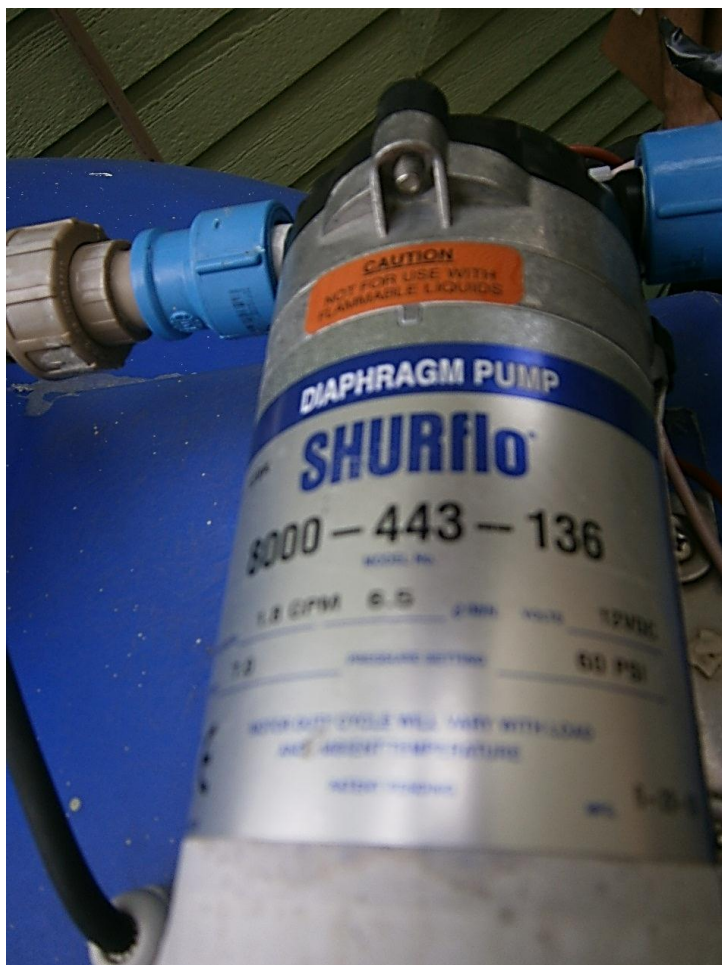


Figura 88 – Moto bomba Shurflo 8000

Fonte: Os autores.

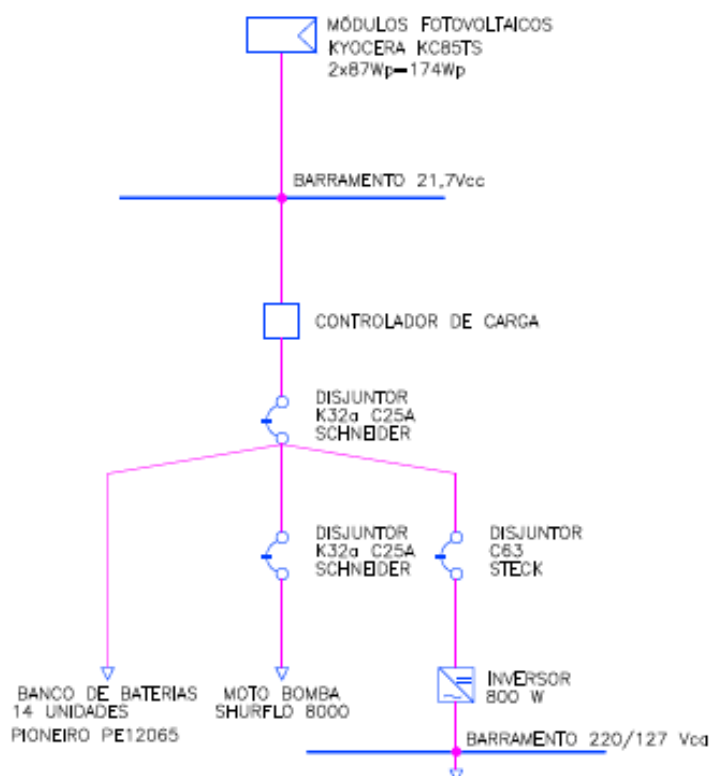


Figura 89 - Diagrama unifilar do SFI, arranjo de 12 V

Fonte: Os autores.

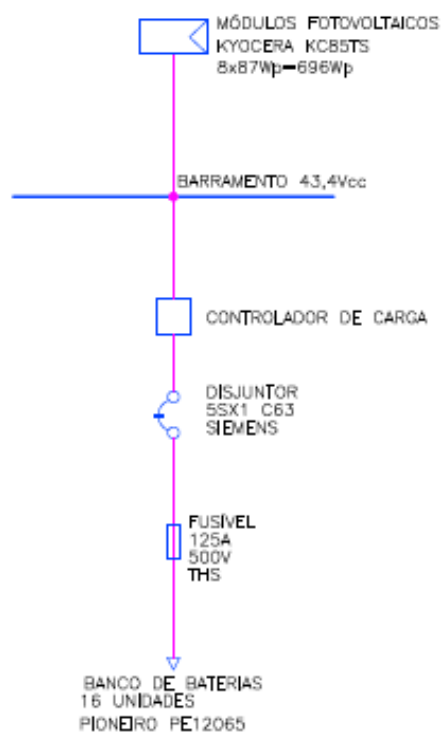


Figura 90 - Diagrama unifilar do SFI, arranjo de 24V

Fonte: Os autores.

6.2 O ESTUDO DA MOTOBOMBA

6.2.1 Objetivo

O que se pretende com este estudo é conhecer o consumo de energia que a moto bomba apresenta durante o processo de bombeamento da água captada da chuva, que fica armazenada na cisterna, até a caixa d'água. Essa caixa d'água irá atender os vasos sanitários e o sistema de irrigação do EV. Além disso, aplicando uma metodologia específica, será obtida a potência fotovoltaica de pico necessária para suprir a demanda da moto bomba. Será calculada, também, a energia disponível por parte do SFI, arranjo de 12 V. Estes resultados permitirão avaliar a confiabilidade e a capacidade de suprimento de energia por parte do SFI.

6.2.2 Medição da vazão da moto bomba

O ensaio consistiu em medir o tempo necessário para a moto bomba encher um galão de 20 litros. Para ser considerada a vazão exata, o galão foi posicionado na frente da tubulação de entrada da caixa d'água. A Figura 91 apresenta a cisterna em azul e ao fundo, a caixa d'água situada mais abaixo, que é alimentada a partir da cisterna. A Figura 92 mostra esta caixa d'água de uma perspectiva mais próxima. A Figura 93 ilustra exatamente o local em que foi posicionado o galão de 20 litros utilizado no ensaio, ou seja, exatamente na entrada da tubulação da caixa d'água.

O acionamento da bomba é feito manualmente, através do disjuntor que se encontra no meio, abaixo do controlador de carga, conforme consta na Figura 94. Assim que o galão foi posicionado e passou a receber a água, o cronômetro foi disparado.

A partir de três amostras, o tempo necessário para o enchimento do galão foi conforme a Tabela 14.

Tabela 14 - Ensaio para obtenção da vazão da moto bomba

| Amostra | 1 | 2 | 3 | Média |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| Volume (l) | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Tempo | 3 min 43 s | 3 min 44 s | 3 min 42 s | 3 min 43 s |

Fonte: Os autores.



Figura 91 - Disposição da cisterna e caixa d'água

Fonte: Os autores.



Figura 92 - Caixa d'água que utiliza a água da chuva

Fonte: Os autores.



Figura 93 - Tubulação de entrada da caixa d'água

Fonte: Os autores.



Figura 94 - Disjuntor que aciona a moto bomba

Fonte: Os autores.

O tempo médio de 3 minutos e 43 segundos foi utilizado para o cálculo da vazão produzida pela moto bomba. Esta vazão é expressa através da equação 34. Além do cálculo para o tempo necessário para o enchimento completo da caixa d'água, partindo-se do nível zero.

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad (34)$$

onde:

Q : vazão produzida pela moto bomba (l/s);

V : volume (l);

Δt : intervalo de tempo (s).

Substituindo os valores do volume (20 l) e do intervalo de tempo (223 s) na equação 34, tem-se:

$$Q = 0,0897 \text{ l/s ou}$$

$$Q = 5,3812 \text{ l/min}$$

Conhecendo-se a vazão, 5,3812 l/min, e também a capacidade da caixa d'água, que é 500 litros, chega-se ao intervalo de tempo para o completo enchimento da caixa d'água, considerando-se que ela estava inicialmente vazia, igual a 92,9161 minutos, o que equivale a 1h32min55s.

6.2.3 Medição da corrente, tensão e potência em função do tempo

Com a intenção de se conhecer a energia consumida pela moto bomba no processo de enchimento da caixa d'água, foram feitas medições, mostradas na Tabela 15, onde na primeira linha têm-se o tempo "t" em minutos, na linha seguinte a tensão "V" em volts, a terceira linha é a corrente "I" em ampères e a última linha mostra a potência instantânea "P" em watts.

Na sequência, foram elaborados os diagramas de dispersão, que ilustram o comportamento de duas grandezas no plano cartesiano, conforme os dados da Tabela 15. A Figura 95 ilustra o comportamento da corrente em relação ao tempo, medida durante a operação da moto bomba. A Figura 96 apresenta a tensão em função do tempo enquanto a moto bomba estava em atividade. Por fim, fazendo o produto entre a corrente e a tensão, obteve-se o comportamento da potência ao longo do tempo, mostrado na Figura 97.

A partir da Figura 97, observa-se que após os instantes iniciais em que a potência é mais elevada, devido a corrente de partida, o comportamento da curva pode ser considerado com variação linear. A metodologia mostrada nos itens 6.2.3.1 e 6.2.3.2, que consta na apostila de Cálculo Numérico (GALVÃO; NUNES, 2011), explica o procedimento para o ajuste de uma curva, a partir de um diagrama de dispersão. Esse processo, portanto, está no domínio discreto, pois o que se tem é uma função f dada por uma tabela de valores.

Tabela 15 - Medição de tensão, corrente e potência em função de t

| t (min) | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| V (V) | 11,29 | 11,3 | 11,31 | 11,31 | 11,31 | 11,31 | 11,31 | 11,31 | 11,31 |
| I (A) | 3,25 | 3,2 | 3,16 | 3,13 | 3,11 | 3,1 | 3,09 | 3,08 | 3,06 |
| P (W) | 36,69 | 36,16 | 35,74 | 35,40 | 35,17 | 35,06 | 34,95 | 34,83 | 34,61 |

| | | | | | | | | | |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| t (min) | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 7,0 | 7,5 | 8,0 | 8,5 | 9,0 |
| V (V) | 11,31 | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 11,3 |
| I (A) | 3,06 | 3,06 | 3,05 | 3,05 | 3,05 | 3,04 | 3,03 | 3,02 | 3,02 |
| P (W) | 34,61 | 34,58 | 34,46 | 34,46 | 34,46 | 34,35 | 34,24 | 34,13 | 34,13 |
| t (min) | 9,5 | 10,0 | 10,5 | 11,0 | 11,5 | 12,0 | 12,5 | 13,0 | 13,5 |
| V (V) | 11,3 | 11,31 | 11,3 | 11,3 | 11,31 | 11,31 | 11,31 | 11,31 | 11,31 |
| I (A) | 3,02 | 3,01 | 3,01 | 3,01 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 |
| P (W) | 34,13 | 34,04 | 34,01 | 34,01 | 33,93 | 33,93 | 33,93 | 33,93 | 33,93 |
| t (min) | 14,0 | 14,5 | 15,0 | 15,5 | 16,0 | 16,5 | 17,0 | 17,5 | 18,0 |
| V (V) | 11,31 | 11,31 | 11,31 | 11,31 | 11,31 | 11,31 | 11,32 | 11,36 | 11,36 |
| I (A) | 2,99 | 2,99 | 2,98 | 2,98 | 2,98 | 2,97 | 2,97 | 2,96 | 2,96 |
| P (W) | 33,82 | 33,82 | 33,70 | 33,70 | 33,70 | 33,59 | 33,62 | 33,62 | 33,62 |
| t (min) | 18,5 | 19,0 | 19,5 | 20,0 | 20,5 | 21,0 | 21,5 | 22,0 | 22,5 |
| V (V) | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,36 |
| I (A) | 2,96 | 2,95 | 2,95 | 2,95 | 2,95 | 2,95 | 2,95 | 2,95 | 2,94 |
| P (W) | 33,62 | 33,51 | 33,51 | 33,51 | 33,51 | 33,51 | 33,51 | 33,51 | 33,40 |
| t (min) | 23,0 | 23,5 | 24,0 | 24,5 | 25,0 | 25,5 | 26,0 | 26,5 | 27,0 |
| V (V) | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,36 |
| I (A) | 2,94 | 2,93 | 2,93 | 2,93 | 2,93 | 2,94 | 2,94 | 2,93 | 2,93 |
| P (W) | 33,40 | 33,28 | 33,28 | 33,28 | 33,28 | 33,39 | 33,39 | 33,28 | 33,28 |
| t (min) | 27,5 | 28,0 | 28,5 | 29,0 | 29,5 | 30,0 | | | |
| V (V) | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,36 | 11,37 | | | |
| I (A) | 2,93 | 2,93 | 2,94 | 2,93 | 2,93 | 2,92 | | | |
| P (W) | 33,28 | 33,28 | 33,40 | 33,28 | 33,28 | 33,20 | | | |

Fonte: Os autores.

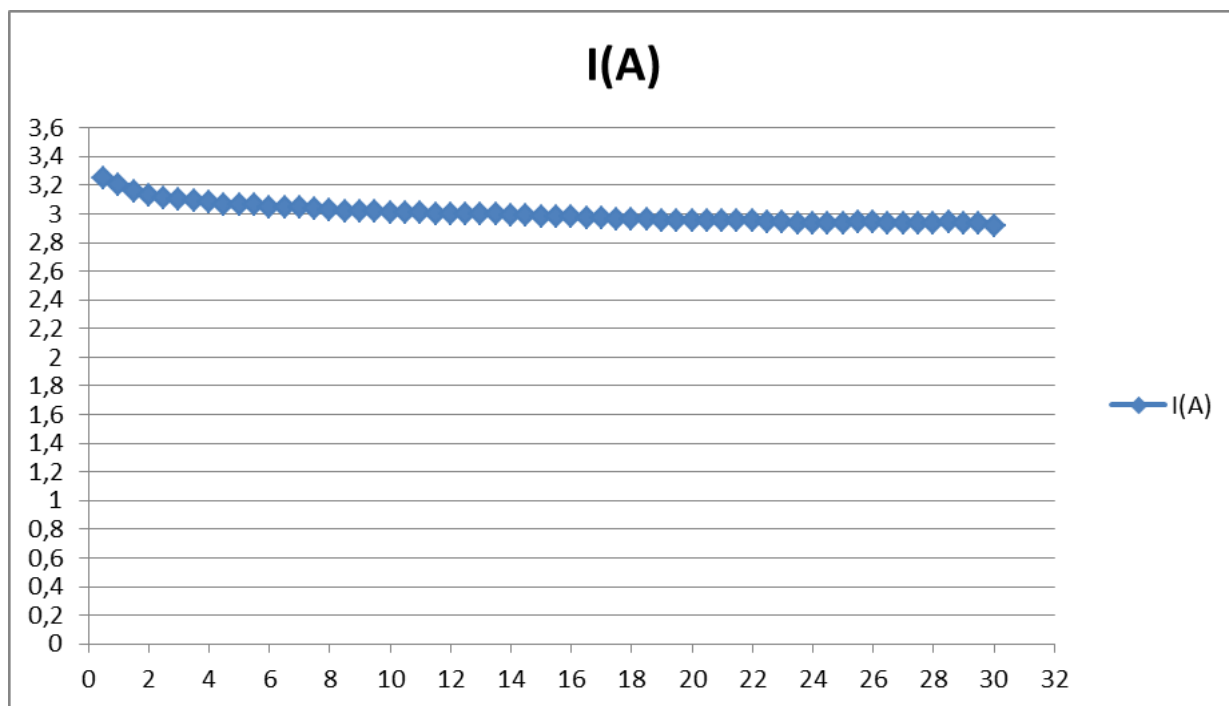


Figura 95 - Corrente em relação ao tempo

Fonte: Os autores.

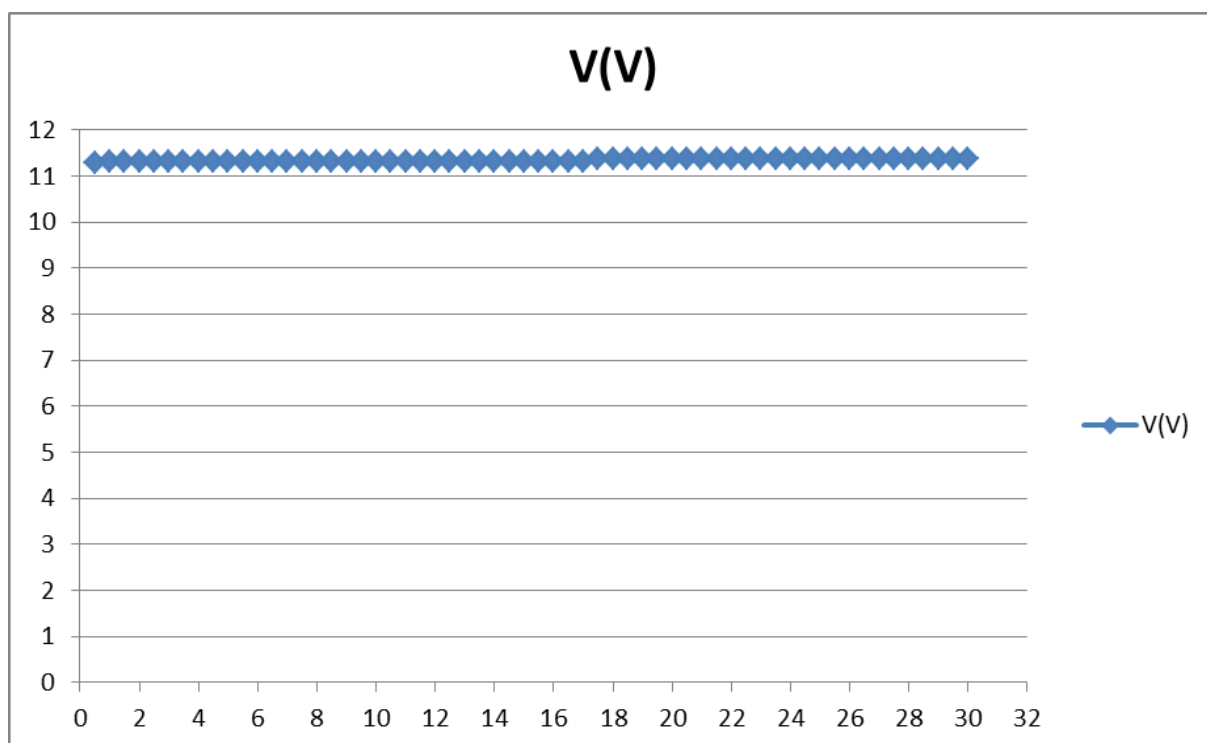


Figura 96 - Tensão em relação ao tempo

Fonte: Os autores.

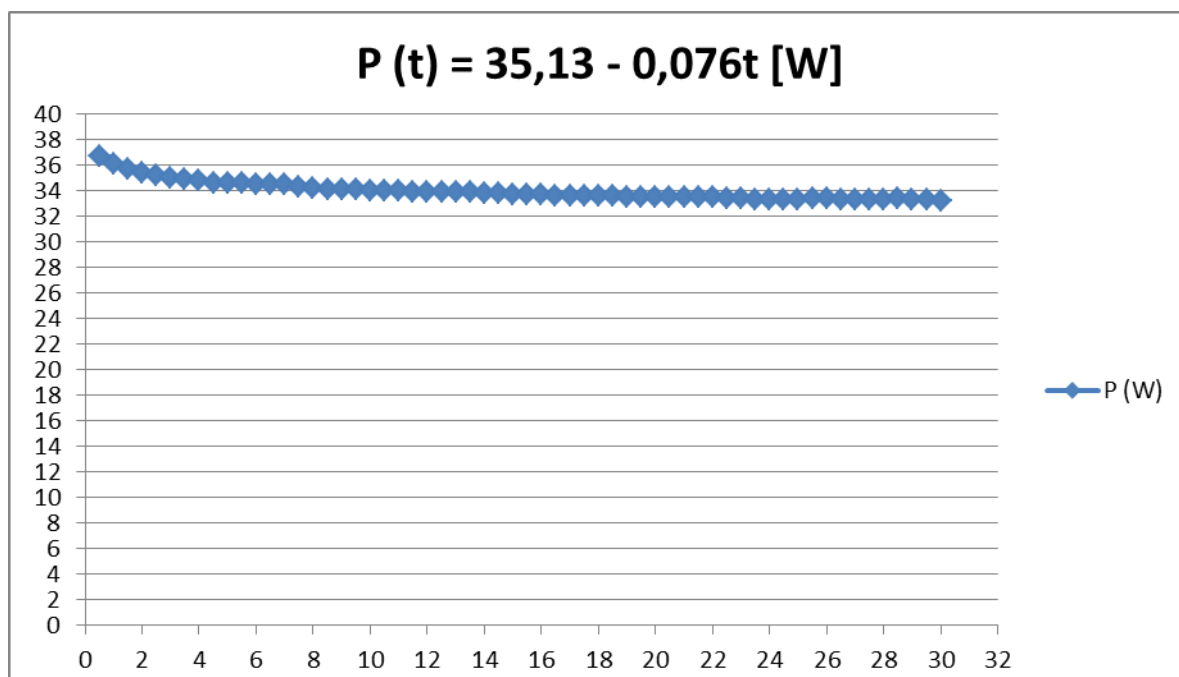


Figura 97 - Potência em relação ao tempo

Fonte: Os autores.

6.2.3.1 Ajuste de curva no domínio discreto

O problema do ajuste de curvas no caso em que se tem uma tabela de pontos:

| | | | | |
|----------|----------|----------|-----|----------|
| x_1 | x_2 | x_3 | ... | x_m |
| $f(x_1)$ | $f(x_2)$ | $f(x_3)$ | ... | $f(x_m)$ |

com $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m \in [a, b]$, consiste em: “escolhidas” n funções contínuas $g_1(x), g_2(x), g_3(x), \dots, g_n(x)$, contínuas em $[a, b]$, obter n constantes $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ tais que a função $g(x) = \alpha_1 g_1(x) + \alpha_2 g_2(x) + \alpha_3 g_3(x) + \dots + \alpha_n g_n(x)$ se aproxime ao máximo de $f(x)$.

Seja $d_k = f(x_k) - g(x_k)$ o desvio em x_k . O método dos mínimos quadrados consiste em escolher os coeficientes $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ de tal forma que a soma dos quadrados dos desvios seja mínima, isto é: $\sum_{k=1}^m d_k^2 = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - g(x_k)]^2$ deve ser mínimo. Assim, os coeficientes $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ que fazem com que $g(x)$ se aproxime ao máximo de $f(x)$, são os que minimizam a função:

$$F(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n) = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - g(x_k)]^2 =$$

$$\sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \alpha_3 g_3(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)]^2$$

Para isto é necessário que:

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha_j}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n) = 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \text{ isto é:}$$

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha_j}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n) =$$

$$2 \cdot \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \alpha_3 g_3(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)] \cdot [-g_j(x_k)] = 0,$$

$j=1, 2, 3, \dots, n$ ou

$$\sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \alpha_3 g_3(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)] \cdot [g_j(x_k)] = 0,$$

$j=1, 2, 3, \dots, n$

Assim, tem-se o seguinte sistema de n equações lineares com n incógnitas,

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$:

$$\sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \alpha_3 g_3(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)] \cdot [g_1(x_k)] = 0$$

$$\sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \alpha_3 g_3(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)] \cdot [g_2(x_k)] = 0$$

⋮

$$\sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \alpha_3 g_3(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)] \cdot [g_n(x_k)] = 0$$

Que é equivalente a:

$$\begin{aligned} & \left[\sum_{k=1}^m g_1(x_k) \cdot g_1(x_k) \right] \alpha_1 + \dots + \left[\sum_{k=1}^m g_1(x_k) \cdot g_n(x_k) \right] \alpha_n = \sum_{k=1}^m g_1(x_k) \cdot f(x_k) \\ & \left[\sum_{k=1}^m g_2(x_k) \cdot g_1(x_k) \right] \alpha_1 + \dots + \left[\sum_{k=1}^m g_2(x_k) \cdot g_n(x_k) \right] \alpha_n = \sum_{k=1}^m g_2(x_k) \cdot f(x_k) \\ & \vdots \\ & \left[\sum_{k=1}^m g_n(x_k) \cdot g_1(x_k) \right] \alpha_1 + \dots + \left[\sum_{k=1}^m g_n(x_k) \cdot g_n(x_k) \right] \alpha_n = \sum_{k=1}^m g_n(x_k) \cdot f(x_k) \end{aligned}$$

As equações deste sistema linear são chamadas de equações normais. Este sistema pode ser escrito na forma matricial $A \cdot \alpha = b$:

$$a_{11}\alpha_1 + a_{12}\alpha_2 + \dots + a_{1n}\alpha_n = b_1$$

$$a_{21}\alpha_1 + a_{22}\alpha_2 + \dots + a_{2n}\alpha_n = b_2$$

⋮

$$a_{n1}\alpha_1 + a_{n2}\alpha_2 + \dots + a_{nn}\alpha_n = b_n$$

Onde $A=(a_{ij})$ tal que $a_{ij}=\sum_{k=1}^m g_i(x_k) \cdot g_j(x_k) = g_j(x_k) \cdot g_i(x_k) = a_{ij}$, ou seja,

A é uma matriz simétrica.

$$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n]^T \text{ e } b = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T \text{ é tal que } b_i = \sum_{k=1}^m g_i(x_k) \cdot f(x_k).$$

Lembrando que, dados os vetores x e $y \in \mathcal{R}^m$ o número real $\langle x, y \rangle = \sum_{k=1}^m x_k \cdot y_k$ é chamado de produto escalar de x por y , e usando esta notação

no sistema normal $A \cdot \alpha = b$, tem-se: $a_{ij} = \langle \bar{g}_i, \bar{g}_j \rangle$ e $b_i = \langle \bar{g}_i, \bar{f} \rangle$ onde:

$$\bar{g}_i \text{ é o vetor } [g_1(x_1)g_1(x_2)g_1(x_3) \dots g_1(x_m)]^T \text{ e}$$

$$\bar{f} \text{ é o vetor } [f(x_1)f(x_2)f(x_3) \dots f(x_m)]^T.$$

Desta forma o sistema na forma matricial fica de acordo com a expressão 35:

$$\begin{bmatrix} \langle \overline{g_1}, \overline{g_1} \rangle & \langle \overline{g_1}, \overline{g_2} \rangle & \dots & \langle \overline{g_1}, \overline{g_n} \rangle \\ \langle \overline{g_2}, \overline{g_1} \rangle & \langle \overline{g_2}, \overline{g_2} \rangle & \dots & \langle \overline{g_2}, \overline{g_n} \rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle \overline{g_n}, \overline{g_1} \rangle & \langle \overline{g_n}, \overline{g_2} \rangle & \dots & \langle \overline{g_n}, \overline{g_n} \rangle \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle \overline{g_1}, \overline{f} \rangle \\ \langle \overline{g_2}, \overline{f} \rangle \\ \vdots \\ \langle \overline{g_n}, \overline{f} \rangle \end{bmatrix} \quad (35)$$

Demonstra-se que, se as funções $g_1(x)$, $g_2(x)$, $g_3(x)$, ..., $g_n(x)$ forem tais que os vetores $\overline{g_1}, \overline{g_2}, \overline{g_3}, \dots, \overline{g_n}$, sejam linearmente independentes (LI), então $\det A \neq 0$ e o sistema de equações é possível e determinado (SPD). Demonstra-se ainda que a solução única deste sistema, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ é o ponto em que a função $F(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n)$ atinge seu valor mínimo.

6.2.3.2 Aplicação do ajuste de curva para a Tabela 15

A potência em função do tempo pode ser expressa como a equação 36, considerando o comportamento linear, de acordo com a Figura 97. Em seguida são apresentados os dados necessários para se montar o sistema matricial. Uma observação importante é que até o instante de tempo 5 minutos a potência apresentou uma variação não linear, portanto, os cálculos foram feitos a partir deste instante para efetuar o ajuste de curva, considerando o comportamento linear.

$$P(t) = \alpha_1 g_1(t) + \alpha_2 g_2(t) \quad (36)$$

Adotando que $g_1(t) = 1$ e $g_2(t) = t$

$$P(t) = \alpha_1 + \alpha_2 t$$

$$\overline{g_1} = [1 \quad \dots \quad 1]$$

$$\overline{g_2} = [0,5 \quad \dots \quad 30]$$

$$\bar{f} = [36,6925 \dots 33,2004]$$

O sistema de equações lineares mostrado na expressão matricial 35, aplicado ao estudo em questão, torna-se conforme a expressão matricial 37:

$$\begin{bmatrix} \langle \bar{g}_1, \bar{g}_1 \rangle & \langle \bar{g}_1, \bar{g}_2 \rangle \\ \langle \bar{g}_2, \bar{g}_1 \rangle & \langle \bar{g}_2, \bar{g}_2 \rangle \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle \bar{g}_1, \bar{f} \rangle \\ \langle \bar{g}_2, \bar{f} \rangle \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\langle \bar{g}_1, \bar{g}_1 \rangle = \bar{g}_1 \cdot \bar{g}_1 = 1(1) + \dots + 1(1) = 60$$

$$\langle \bar{g}_1, \bar{g}_2 \rangle = \langle \bar{g}_2, \bar{g}_1 \rangle = \bar{g}_1 \cdot \bar{g}_2 = 1(0,5) + \dots + 1(30) = 915$$

$$\langle \bar{g}_2, \bar{g}_2 \rangle = \bar{g}_2 \cdot \bar{g}_2 = 5(5) + 5,5(5,5) + \dots + 30(30) = 18452,5$$

$$\langle \bar{g}_1, \bar{f} \rangle = \bar{g}_1 \cdot \bar{f} = 1(34,6086) + \dots + 1(33,2004) = 2038,346$$

$$\langle \bar{g}_2, \bar{f} \rangle = \bar{g}_2 \cdot \bar{f} = 5(34,6086) + \dots + 30(33,2004) = 30742,91$$

Substituindo os valores na expressão matricial 37, chega-se ao sistema de equações lineares em 38.

$$\begin{bmatrix} 60 & 915 \\ 915 & 18452,5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2038,35 \\ 30742,91 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\alpha_1 = 35,13$$

$$\alpha_2 = -0,076$$

Substituindo os valores α_1 , α_2 , $g_1(t)$ e $g_2(t)$ em 36, a equação 39 é a curva ajustada para os pontos mostrados na Tabela 15.

$$P(t) = 35,13 - 0,076t \quad (39)$$

onde:

P: potência desenvolvida pela moto bomba, em Watts;

t: instante de tempo, em minutos;

sendo o domínio da função: $0,5 < t < 30$ minutos.

6.2.4 Energia consumida pela moto bomba

A partir da equação 39 tem-se o comportamento da potência ao longo do tempo, para o domínio mostrado acima. Esta moto bomba faz o aproveitamento da água da chuva. Como foi concluído no item 6.2.2, o tempo necessário para o completo enchimento da caixa d'água, partindo-se de uma situação inicial em que ela está vazia, é de 1h32min55s. Para se avaliar a energia consumida pela moto bomba durante esse processo de bombeamento de água para a caixa d'água, foi utilizado o processo de integração da equação 39. O instante de tempo inicial adotado foi de 0,5 minutos, para desconsiderar a corrente de partida do motor nos instantes iniciais. O instante de tempo final adotado correspondeu ao último instante da medição, que é igual a 30 minutos. A partir do instante de tempo de 30 minutos até o instante final de 92,917 minutos, que equivale a 1h32min55s, a potência demandada foi considerada constante, ou seja, a moto bomba estaria operando em regime permanente, podendo desprezar as variações de potência que estivessem ocorrendo. A equação 40 ilustra o processo de cálculo, que fornece o valor da energia consumida durante a operação da moto bomba.

$$E = \int_{0,5}^{30} P(t).dt + P.\Delta t \quad (40)$$

$$\begin{aligned} E &= \int_{0,5}^{30} (35,13 - 0,076t).dt + 33,2.(92,917 - 30) \\ &= \int_{0,5}^{30} 35,13.dt + \int_{0,5}^{30} (-0,076t).dt + 2088,4444 \\ &= \left[35,13t - \frac{0,076}{2}t^2 \right]_{0,5}^{30} + 2088,4444 \\ &= \left[35,13.(30 - 0,5) - \frac{0,076}{2}.(30^2 - 0,5^2) \right] + 2088,4444 \end{aligned}$$

$$E = 3090,9889 \text{ W.min ou } E = 51,5165 \text{ Wh.}$$

6.3 IRRADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA NO PAINEL FOTOVOLTAICO DO EV

O banco de dados do projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resources Assessment*) fornece a irradiação diária média no plano horizontal. O EV da UTFPR está situado nas seguintes coordenadas: latitude de $-25,44^{\circ}$ e longitude $-49,26^{\circ}$. O projeto SWERA fornece pontos de 10 em 10 km, então foi adotado o ponto mais próximo do EV, que corresponde às coordenadas: latitude $-25,43^{\circ}$ e longitude igual a $-49,27^{\circ}$. Os dados obtidos para este ponto, que se situa a aproximadamente 1 km do EV, são mostrados na Tabela 16.

Tabela 16 - Irradiação diária média no plano horizontal fornecida pelo projeto SWERA

| kWh/m ² .dia | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
| 5,67 | 5,47 | 5,05 | 4,12 | 3,29 | 3,08 | 3,28 | 4,21 | 4,30 | 5,02 | 5,97 | 5,92 |

Fonte: Os autores.

Esses dados servem como parâmetros de entrada para o programa RADIASOL, que fornece a irradiação diária média no plano dos módulos fotovoltaicos do Sistema Fotovoltaico Isolado do EV. A Figura 98 ajuda a compreender o que foi feito para calcular a inclinação dos módulos fotovoltaicos em relação ao plano horizontal. Para facilitar o entendimento é bom observar a Figura 83. Primeiramente, é preciso conhecer a inclinação dos módulos em relação ao telhado do EV. Para isso, foram obtidas medidas no local, à saber: o comprimento da superfície do módulo, que é igual 1,32 metros; o comprimento do suporte maior do módulo, que é igual a 0,308 metros; o comprimento do suporte menor do módulo, que é igual a 0,15 metros; por fim, a diferença entre o suporte maior e menor, que vale 0,158 metros.

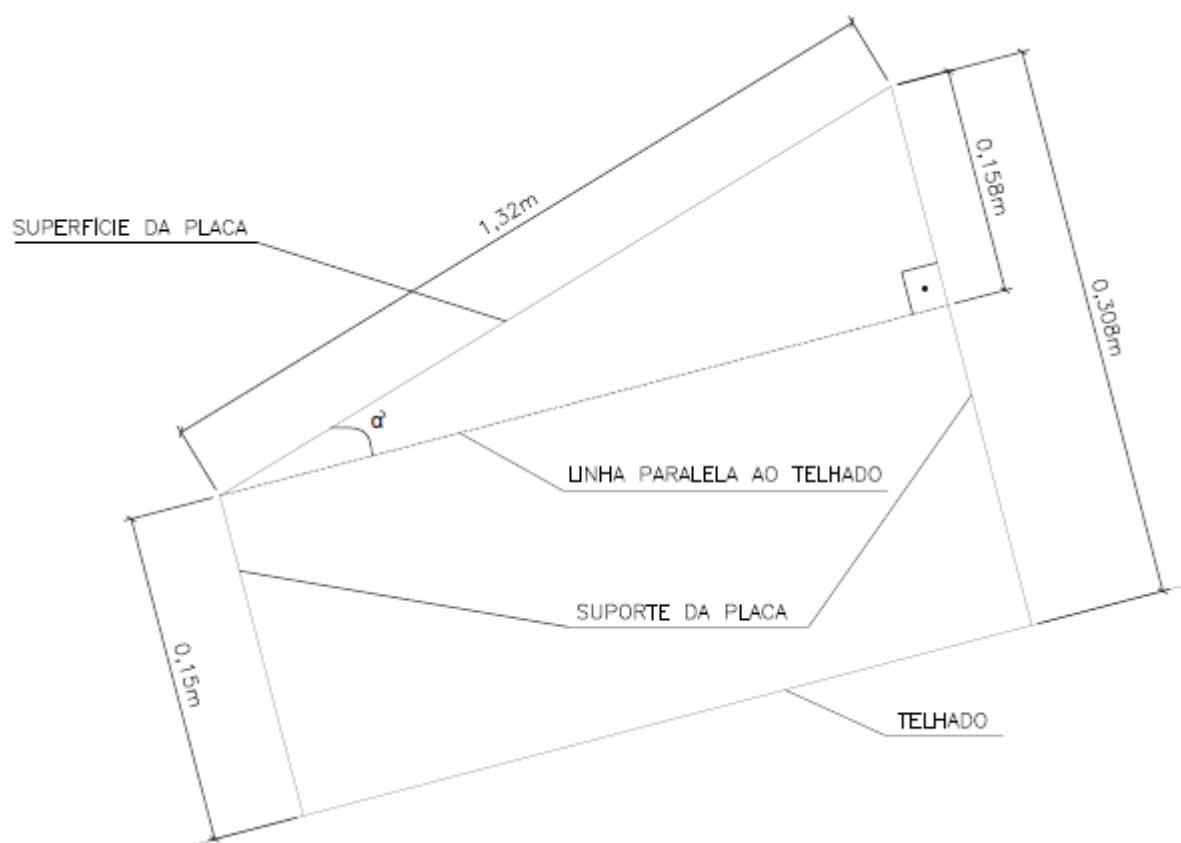


Figura 98 - Inclinação dos módulos em relação ao telhado

Fonte: Os autores.

Com esses dados é possível calcular o ângulo α' a partir da relação trigonométrica do seno de um ângulo. A equação 41 é aplicada neste cálculo.

$$\sin \alpha' = \frac{CO}{HIP} \quad (41)$$

onde:

α' : ângulo de inclinação dos módulos em relação ao telhado do EV;

CO: cateto oposto;

HIP: hipotenusa.

Substituindo os valores na equação 38:

$$\sin \alpha' = \frac{0,158}{1,32} = 0,1197 \therefore \alpha' = \sin^{-1}(0,1197)$$

$$\alpha' = 6,87^{\circ}$$

A Figura 99 ilustra o procedimento para cálculo do ângulo de inclinação do telhado do EV em relação ao plano horizontal.

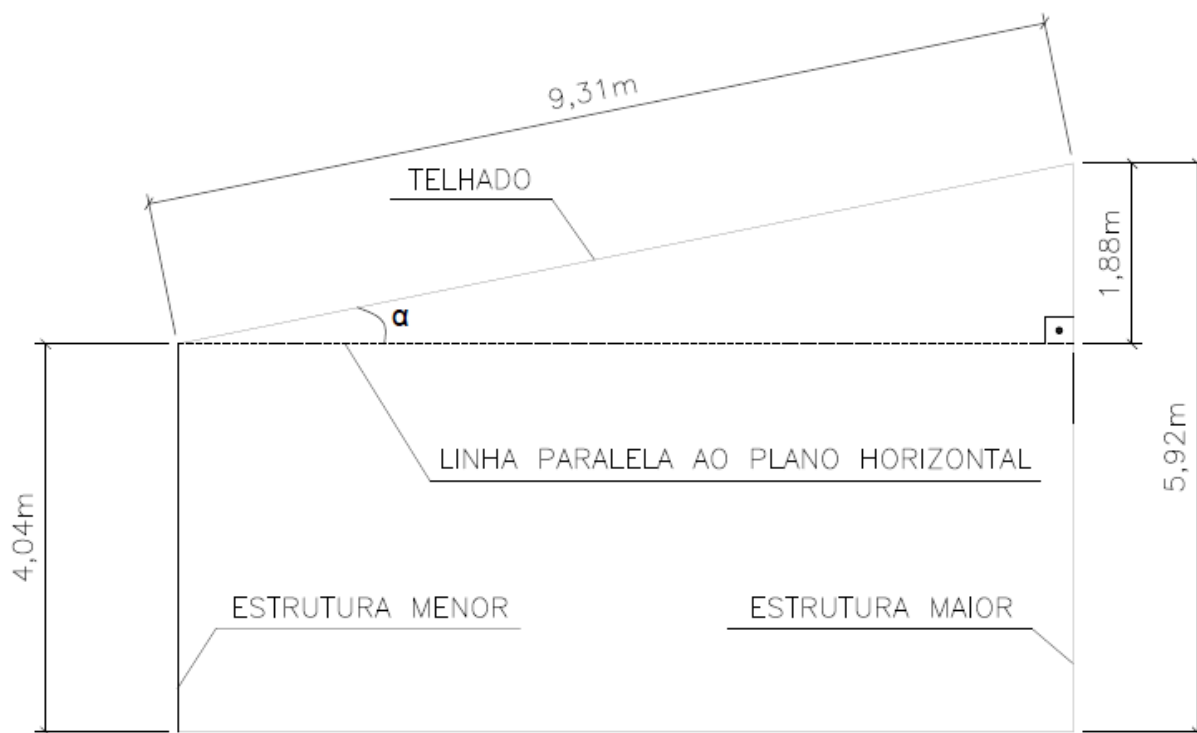


Figura 99 - Inclinação do telhado em relação ao plano horizontal

Fonte: Os autores.

Foram obtidas medidas de altura, referentes à estrutura maior e menor que sustentam o telhado do EV, e os valores foram 5,92 metros e 4,04 metros, respectivamente. A diferença entre esses valores é 1,88 metros. O comprimento medido do telhado foi 9,31 metros. A partir da equação 41, pode-se obter o ângulo α , que mostra a inclinação do telhado do EV em relação ao plano horizontal.

$$\sin \alpha = \frac{1,88}{9,31} = 0,2019 \therefore \alpha = \sin^{-1}(0,2019)$$

$$\alpha = 11,65^{\circ}$$

A partir da soma dos ângulos α' e α pode-se obter a inclinação dos módulos do SFI do EV em relação ao plano horizontal, chamada de β . Matematicamente, têm-se a equação 42.

$$\beta = \alpha' + \alpha = 6,87^{\circ} + 11,65^{\circ} = 18,52^{\circ} \quad (42)$$

$$\beta = 18,52^{\circ}$$

A partir dos dados de entrada, mostrados na Figura 100, entra-se com a inclinação β dos módulos em relação ao plano horizontal, bem como com o desvio azimutal de 22° para oeste, obtendo os dados mostrados na Figura 101.

The screenshot shows the RADIASOL program interface. At the top, it says "Selecione um país e uma estação" (Select a country and a station). Below this, there are two dropdown menus: "País" (Country) set to "Brazil" and "Estação" (Station) set to "EV UTFPR CTBA". To the right, there is a small map of Brazil with the text "RADIÇÃO SOLAR" (Solar Radiation) overlaid. Below the dropdowns are three buttons: "OK", "Editar" (Edit), and "Sair" (Exit). Further down, there are input fields for "Latitude" (25,44), "N/S:" (S), "Longitude" (49,00), and "E/W:" (W). At the bottom, there is a table of monthly radiation values in kWh/m².

| JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 5,67 | 5,47 | 5,05 | 4,12 | 3,29 | 3,08 | 3,28 | 4,21 | 4,30 | 5,02 | 5,97 | 5,92 |

Radiação em kWh/m²

Figura 100 - Dados de entrada do programa RADIASOL

Fonte: Os autores.

A Tabela 17 mostra os valores de irradiação diária média no plano dos módulos do SFI do EV, obtidas pelo programa RADIASOL, disponibilizado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, 2012).

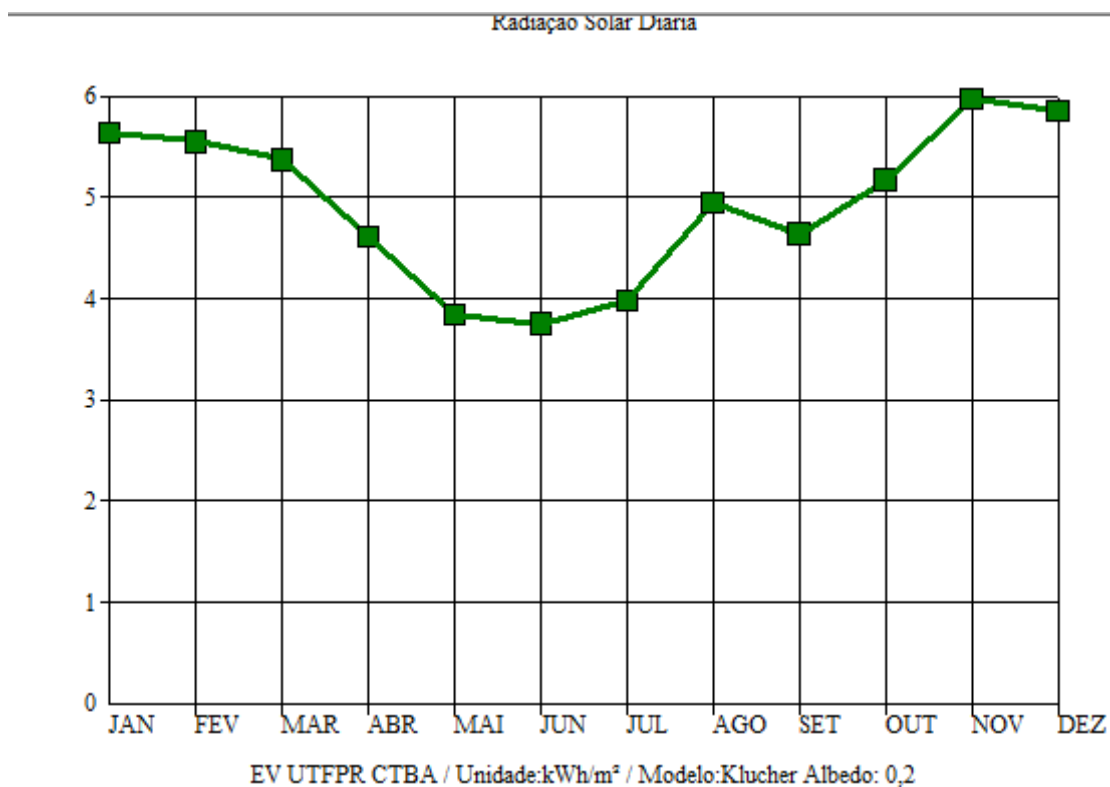


Figura 101 - Irradiação diária média nos módulos

Fonte: Os autores.

Tabela 17 - Irradiação diária média no plano dos módulos

| kWh/m².dia | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
| 5,637 | 5,556 | 5,375 | 4,619 | 3,839 | 3,754 | 3,980 | 4,948 | 4,641 | 5,172 | 5,973 | 5,859 |

Fonte: Os autores.

6.4 POTÊNCIA FOTOVOLTAICA DE PICO

A potência fotovoltaica de pico instalada para alimentar a moto bomba pode ser determinada pela expressão 43 (URBANETZ JUNIOR, J., 2012).

$$P_{FV} = \frac{E.G}{H_{TOT} \cdot R} \cdot F_{CARREG} \quad (43)$$

onde:

P_{FV} : potência fotovoltaica de pico instalada (Wp);

E : energia demandada pelas cargas diariamente (Wh/dia);

G : irradiância nas condições STC (1.000 W/m²);

H_{TOT} : irradiação solar incidente no plano dos módulos fotovoltaicos (Wh/m².dia);

F_{CARREG} : fator de carregamento diário das baterias, adotado 1,1;

R: rendimento do conjunto de aparelhos e componentes do sistema: controlador de carga, bateria, inversor e fiação.

$$P_{FV} = \frac{51,5165 (1000)}{3754(0,75)} 1,1 = 20,1272$$

$$P_{FV} = 20,1272 \text{ W}$$

Algumas observações quanto à aplicação da equação 43:

- o valor H_{TOT} utilizado corresponde ao pior caso, que para a localidade do EV é o mês de junho, em que a irradiação diária média é 3.754 Wh/m².dia;
- o rendimento R do sistema foi aproximado por 75%. Esse valor situa-se na faixa de 60 a 75% para SFIs (URBANETZ JUNIOR, J., 2012). Esse valor máximo se deve a ausência de um inversor para atender a carga, pois a moto bomba funciona em regime CC. O processo de medição do rendimento do SFI fugiria do escopo deste trabalho, por ser demasiado complexo. Este rendimento considera a eficiência da tecnologia fotovoltaica empregada, que para este exemplo é o silício policristalino, cuja eficiência atinge um nível de aproximadamente 16%; além disso, considera o controlador de carga e as baterias.

6.4.1 Observações finais para o sistema fotovoltaico isolado

O SFI do EV, que se divide no arranjo de 12 V e no arranjo de 24 V, possui no primeiro arranjo uma potência de pico instalada igual a 174 W. Esse valor é cerca de 9 vezes superior a potência fotovoltaica aproximada de 20 W necessária para

alimentar a moto bomba, obtida no cálculo de dimensionamento, através da equação 43.

Pode-se fazer o cálculo para obter a energia disponível para as cargas conectadas no SFI referente ao arranjo de 12 V, conforme a equação 44.

$$E = \frac{P_{FV} \cdot H_{TOT} \cdot R}{G \cdot F_{CARREG}} \quad (44)$$

$$E = \frac{(174)(3754)(0,75)}{(1000)(1,1)} = 445,3609$$

$$E = 445,3609 \text{ Wh}$$

Pode-se aplicar a equação 45 e obter o número máximo de operações diárias de completo enchimento da caixa d'água.

$$N_{OP} = \frac{E_D}{E_C} \quad (45)$$

onde:

N_{OP} : número máximo de operações diárias da moto bomba;

E_D : energia disponível pelo SFI em 12 V;

E_C : energia consumida pela moto bomba durante o enchimento da caixa d'água

$$N_{OP} = \frac{445,3609}{51,5165} = 8,64$$

A partir dos resultados, pode-se concluir que o SFI em 12 V possui uma margem de segurança bastante ampla para o atendimento da moto bomba. Cabe salientar que a água aproveitada da chuva e armazenada numa das caixas d'água do EV serve para atender aos dois vasos sanitários e a irrigação externa. Essa caixa d'água possui 500 litros de capacidade. O consumo diário para essa caixa d'água é de difícil estimativa, pois o EV apresenta um fluxo de pessoas bastante variável. Para se ter uma noção do gasto, a descarga consome 3 ou 6 litros, dependendo do fluxo a ser acionado pelo usuário. Já a irrigação do jardim de parede, localizado

próximo da moto bomba, atua durante 5 minutos, o que produz algo em torno de 26,9 litros (a vazão da moto bomba vale 5,38 l/min, conforme item 6.2.2).

Se for considerado que uma irrigação por dia seja feita no jardim de parede, restam 473 litros na caixa d'água, que corresponde a cerca de 78 acionamentos da descarga no fluxo máximo, o que é, naturalmente, bem acima do padrão de uso do EV.

6.5 ESTUDO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA

6.5.1 Apresentação

O EV apresenta um SFCR composto por 10 módulos fotovoltaicos, da marca KYOCERA, modelo KD210GX-LP, totalizando 2,1 kWp de potência instalada. A Figura 102 ilustra o telhado do EV, sendo os módulos da parte inferior constituintes do SFCR.

Esse sistema possui um inversor monofásico de 2 kW de potência nominal e saída de 220 V, que faz a conversão de regime CC para CA. A Figura 103 apresenta o diagrama unifilar geral da instalação elétrica do EV.

Esse sistema está operando desde 14 de dezembro de 2011. O medidor 1 registra a energia elétrica gerada pelo SFCR, enquanto que o medidor 2 apresenta a energia elétrica consumida pelo EV, que possui nas suas instalações o quadro elétrico chamado de QFL-V-05-TR. O medidor 3 registra a diferença entre a energia consumida no EV e a energia fotovoltaica gerada, ou seja, a diferença entre a leitura do medidor 2 e do medidor 1.

Sendo assim, tem-se duas situações: a diferença negativa, o que significa que a energia gerada excedente é injetada no bloco V da UTFPR (quadro elétrico QFL-V-01-TR); a diferença positiva, que representa que a energia gerada é insuficiente para suprir as cargas do EV, portanto a energia que falta é suprida pela rede da COPEL.



Figura 102 - Módulos fotovoltaicos do EV

Fonte: Os autores.

A Figura 104 apresenta os medidores, sendo que da esquerda para a direita, na linha de cima, tem-se os medidores 3 e 1, enquanto que na linha de baixo tem-se o medidor 2. Os medidores 3 e 1 são da marca Siemens, modelo SENTRON PAC3200. O medidor 2 é da mesma marca, mas o modelo é SENTRON PAC4200.

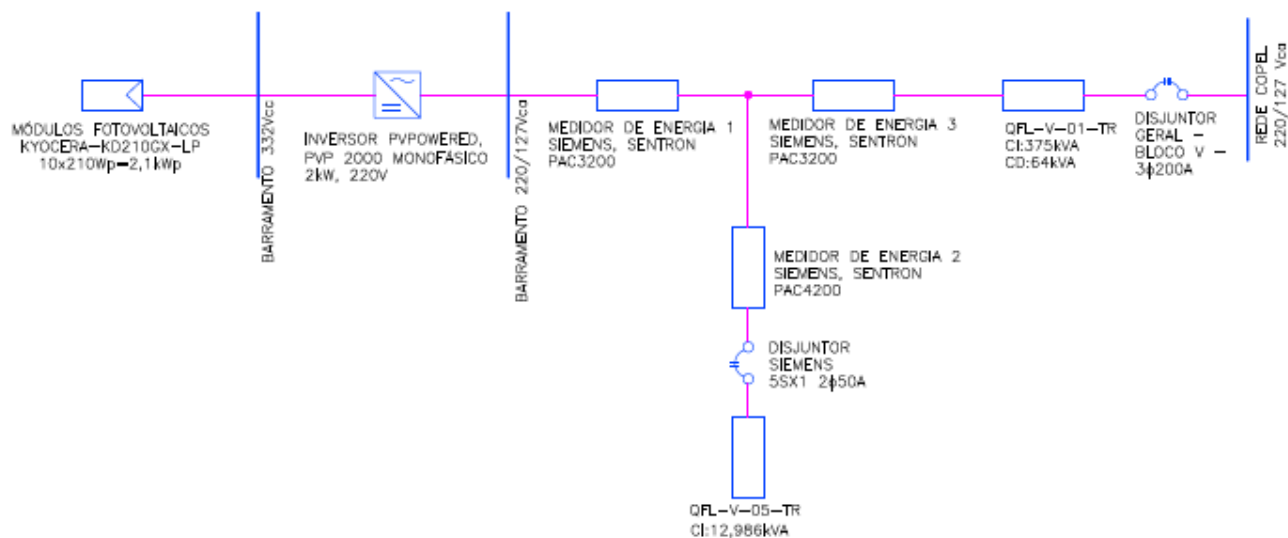


Figura 103 - Diagrama unifilar geral do Escritório Verde

Fonte: Os autores.



Figura 104 - Medidores de energia do EV

Fonte: Os autores.

6.5.2 Registros das medições

As Figuras 105, 106 e 107 apresentam a quantidade de horas de operação, dos medidores de energia do EV, desde a sua instalação.

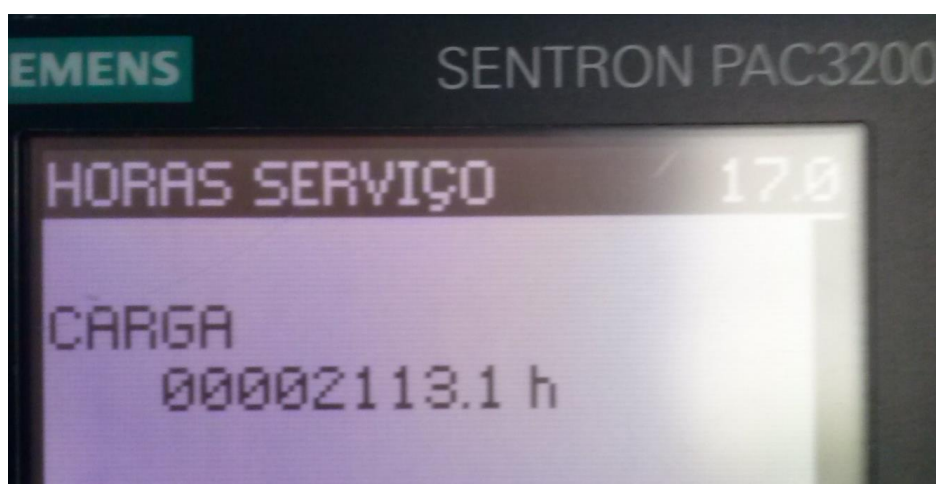


Figura 105 - Horas de operação do medidor 1

Fonte: Os autores.



Figura 106 - Horas de operação do medidor 2

Fonte: Os autores.

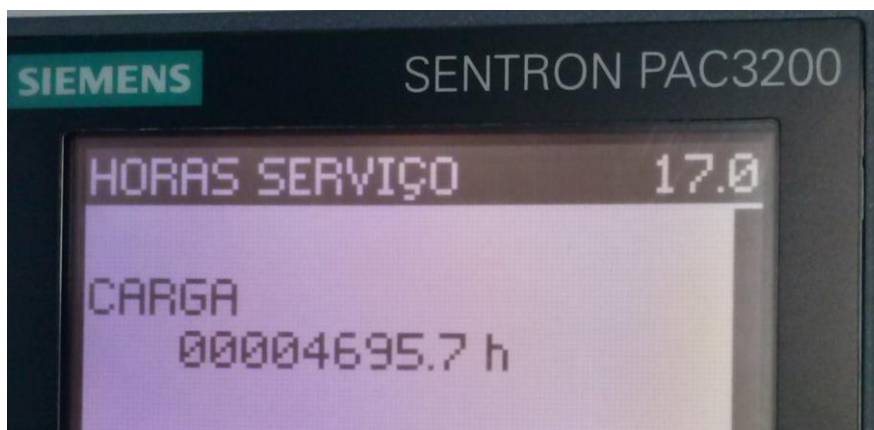


Figura 107 - Horas de operação do medidor 3

Fonte: Os autores.

A partir disso, as Tabelas 18, 19 e 20 mostram os valores registrados no medidor 1, medidor 2 e medidor 3, respectivamente. Os valores mostrados referem-se à energia ativa acumulada no dia, considerando o período de 21/12/2012 até 30/01/2013. Para considerar a defasagem nos tempos de operação de cada medidor, o dia 21/12 é tomado como instante inicial, sendo considerado o valor zero para as leituras e, a partir disso, os dias posteriores mostram a energia acumulada, em relação ao instante inicial. As Tabelas 21, 22 e 23 apresentam esses valores.

Tabela 18 - Registros de energia ativa do medidor 1

| Data | 21/12 | 26/12 | 28/12 | 02/01 | 04/01 | 07/01 | 09/01 | 10/01 | 14/01 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Energia ativa (kWh) | 1.167 | 1.209 | 1.219 | 1.246 | 1.251 | 1.278 | 1.285 | 1.292 | 1.324 |
| Data | 16/01 | 18/01 | 22/01 | 24/01 | 28/01 | 30/01 | | | |
| Energia ativa (kWh) | 1.339 | 1.355 | 1.391 | 1.407 | 1.437 | 1.450 | | | |

Fonte: Os autores.

Tabela 19 - Registros de energia ativa do medidor 2

| Data | 21/12 | 26/12 | 28/12 | 02/01 | 04/01 | 07/01 | 09/01 | 10/01 | 14/01 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Energia ativa (kWh) | 824 | 841 | 847 | 859 | 865 | 876 | 881 | 884 | 896 |
| Data | 16/01 | 18/01 | 22/01 | 24/01 | 28/01 | 30/01 | | | |
| Energia ativa (kWh) | 901 | 907 | 919 | 925 | 935 | 941 | | | |

Fonte: Os autores.

Tabela 20 - Registros de energia ativa do medidor 3

| Data | 21/12 | 26/12 | 28/12 | 02/01 | 04/01 | 07/01 | 09/01 | 10/01 | 14/01 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Energia ativa (kWh) | 824 | 841 | 847 | 859 | 865 | 876 | 881 | 884 | 896 |
| Data | 16/01 | 18/01 | 22/01 | 24/01 | 28/01 | 30/01 | | | |
| Energia ativa (kWh) | 901 | 907 | 919 | 925 | 935 | 941 | | | |

Fonte: Os autores.

Tabela 21 - Medições considerando a defasagem para o medidor 1

| Data | 21/12 | 26/12 | 28/12 | 02/01 | 04/01 | 07/01 | 09/01 | 10/01 | 14/01 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Energia ativa (kWh) | 0 | 41,1 | 52,1 | 78,8 | 83,8 | 110,7 | 117,5 | 124,4 | 156,8 |
| Data | 16/01 | 18/01 | 22/01 | 24/01 | 28/01 | 30/01 | | | |
| Energia ativa (kWh) | 171,9 | 187,6 | 223,7 | 239,2 | 269,9 | 283,0 | | | |

Fonte: Os autores.

Tabela 22 - Medições considerando a defasagem para o medidor 2

| Data | 21/12 | 26/12 | 28/12 | 02/01 | 04/01 | 07/01 | 09/01 | 10/01 | 14/01 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Energia ativa (kWh) | 0 | 16,9 | 22,9 | 35,5 | 41,6 | 52,1 | 57,6 | 60,4 | 72,0 |
| Data | 16/01 | 18/01 | 22/01 | 24/01 | 28/01 | 30/01 | | | |
| Energia ativa (kWh) | 77,1 | 82,8 | 95,7 | 100,9 | 111,6 | 117,1 | | | |

Fonte: Os autores.

Tabela 23 - Medições considerando a defasagem para o medidor 3

| Data | 21/12 | 26/12 | 28/12 | 02/01 | 04/01 | 07/01 | 09/01 | 10/01 | 14/01 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Energia ativa (kWh) | 0 | 10,0 | 13,9 | 22,0 | 26,0 | 32,1 | 35,6 | 37,3 | 43,9 |
| Data | 16/01 | 18/01 | 22/01 | 24/01 | 28/01 | 30/01 | | | |
| Energia ativa (kWh) | 47,0 | 49,7 | 57,6 | 60,8 | 67,4 | 70,2 | | | |

Fonte: Os autores.

A partir da Tabela 21, tem-se que para 30 dias, entre 28/12 e 28/01, a energia gerada pelo SFCR foi de 217,79 kWh. Utilizando o mesmo período de 30 dias, a partir da Tabela 22, calcula-se a energia consumida no EV igual a 88,69 kWh. Aplicando o mesmo procedimento com base nos dados da Tabela 23, obteve-se uma energia de 53,46 kWh, que não equivale a diferença entre os medidores 2 e 1, que resultaria em -129,1 kWh, utilizando o valor absoluto, 129,1 kWh. Tal fato, provavelmente, deve-se a problemas quanto à instalação dos medidores.

6.5.3 Observações finais quanto as medições registradas

A leitura do medidor 3 deveria mostrar a diferença entre as leituras dos medidores 2 e 1. Observando-se os registros na Tabela 23, os valores encontrados não correspondem aos resultados obtidos por cálculos, efetuando-se a diferença entre os valores das Tabelas 22 e 21. O medidor 3, apresentado no item 6.5.1, provavelmente, não estava instalado corretamente no período em que foram obtidas as leituras. Além disso, existe a possibilidade de implantação de um software a ser instalado no EV, que possibilitará o acesso remoto às leituras dos três medidores. Tais avanços ampliarão as possibilidades de pesquisa e estudo do SFCR presente no EV.

6.6 SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA

Apesar de ser abordada a geração eólica na fundamentação teórica deste trabalho, nesta etapa de medições e verificações não será discutido este assunto. O motivo é que o aerogerador, cuja potência nominal é de 500 W, encontra-se desligado. Futuros trabalhos de pesquisa poderão avaliar a eficiência energética deste equipamento, tendo como ponto inicial os estudos prévios das condições de vento na região do EV, entre outros parâmetros necessários para viabilizar a operação do aerogerador.

7 ESTUDO LUMINOTÉCNICO DO ESCRITÓRIO VERDE

7.1 APRESENTAÇÃO

Uma das inovações tecnológicas aplicadas no EV é a utilização de LEDs na iluminação. Seu sistema de iluminação apresenta luminárias LED da marca LUMIDEC, de diversos modelos e potências, de acordo com a necessidade do ambiente.

O estudo luminotécnico objetiva avaliar a eficiência energética proporcionada pela utilização de luminárias LED em relação à utilização das tecnologias comuns, como por exemplo, lâmpadas incandescentes, fluorescentes e fluorescentes compactas.

7.1.1 Descrição das luminárias

No EV são utilizados cinco tipos diferentes de luminárias LED para iluminação interna, sendo quatro embutidas e uma pendente, de acordo com o modo de instalação, além de balizador para a escada e dois tipos de luminárias para iluminação externa.

A Figura 108 apresenta a luminária EF27-E1LED de embutir com 1 W de potência. Luminária de embutir completa, corpo em alumínio com pintura branca microtexturizada, com LED de alta performance e driver incluso. Apresenta fecho luminoso fixo e recuado.



Figura 108 - Luminária embutida 1 W

Fonte: Os autores.

A Figura 109 apresenta a luminária cod. EF28-E3LED com 3 W de potência. Luminária de embutir completa, corpo em alumínio com pintura branca microtexturizada, com LEDs de alta performance e driver incluso. Apresenta fecho luminoso fixo e recuado.



Figura 109 - Luminária embutida 3 W

Fonte: Os autores.

A Figura 110 apresenta a luminária cod. ER16-E4MLED com potência de 12 W. Luminária de embutir completa, corpo em alumínio com pintura branca microtexturizada, com LEDs de alta performance e driver incluso. Apresenta fecho luminoso orientável.



Figura 110 - Luminária embutida 12 W

Fonte: Os autores.

A Figura 111 apresenta a luminária cod. EF35-E24LED4K com potência de 24 W. Luminária de embutir completa, com LED de alta performance, driver multitemperatura incluso (100 V a 250 V), corpo em alumínio com pintura branca microtexturizada, refletor em alumínio anodizado fosco e difusor recuado em acrílico leitoso.



Figura 111 - Luminária embutida 24W

Fonte: Os autores.

A Figura 112 apresenta a luminária cod. PD44-P33LED4K com potência de 24 W. Luminária completa com LEDs de alto desempenho, driver multitensão (100 V a 250 V), corpo em alumínio com pintura microtexturizada e difusores em acrílico leitoso. Utilizado para iluminação direta e indireta.



Figura 112 - Luminária pendente 33 W

Fonte: Os autores.

7.1.2 Descrição dos ambientes internos

O EV apresenta nove ambientes internos iluminados, cada um de acordo com a função a ser desempenhada no local, são eles:

- coordenação: ambiente de 15,86 m² utilizado para as atividades de gerenciamento do EV. Sua iluminação é realizada por nove luminárias LED modelo EF35-E24LED4K;
- escritório: sala mais ampla do estabelecimento com 54,20 m² de área destinada às reuniões e palestras ministradas no local. É iluminada por doze luminárias do tipo pendente, modelo PD44-P33LED4K;

- catálogos: área de 8,94 m² onde são apresentadas as tecnologias empregadas nas instalações do EV pelos parceiros da obra, através de *folders* e amostras de materiais, além de abrigar os medidores de energia, o quadro de distribuição e o servidor. São utilizadas dez luminárias modelo EF28-E3LED e uma luminária modelo EF35-E24LED4K;
- circulação: área de 6,12 m² para passagem e acesso aos banheiros masculino e feminino e à área técnica. Apresenta duas luminárias modelo EF35-E24LED4K;
- banheiros masculino e feminino: ambos apresentam área de 8,66 m² e são iluminadas por uma luminária LED modelo EF35-E24LED4K em cada um dos ambientes;
- café: área de 22,58 m² iluminada por cinco luminárias modelo ER16-E4MLED, sete luminárias modelo EF28-E3LED e seis luminárias modelo EF27-E1LED;
- mezanino: área de 26,77 m². Área destinada às atividades da empresa junior vinculada ao EV. Sua iluminação é composta por três luminárias pendentes modelo PD44-P33LED4K.

Ainda existem dois ambientes internos não mencionados. A escada, com área de 6,48 m² é iluminada por dez balizadores modelo BZ17-E1LEDW de 0,6 W localizadas a 10 cm do degrau, e a área técnica, que não apresenta iluminação.

No ANEXO B, são apresentadas as plantas arquitetônicas do EV, disponibilizadas pela empresa TECVERDE, desenvolvedora do projeto arquitetônico, com as dimensões de cada área demonstradas.

A Figura 113 apresenta a legenda necessária para a leitura das Figuras 114 e 115, que representam a distribuição das lâmpadas no EV.





| LEGENDA | |
|---|---|
|  | Pendente Direto / Indireto 33W LED Mod. PD44–P33LED4K |
|  | Embutido Quadrado 24W LED Mod. EF35–E24LED4K |
|  | Embutido Quadrado 12W LED Mod. ER16–E4MLED |
|  | Embutido Quadrado 3W LED Mod. EF28–E3LED |
|  | Embutido Quadrado 1W LED Mod. EF27–E1LED |
|  | Embutido de Solo p/ Lâmpada PAR20 LED (LEDMAX) |
|  | Arandela Externa 6W LED Mod. AR72–S6LED4K |
|  | Balizador 0,6W LED Mod. BZ17–E1LEDW |

Figura 113 - Legenda das luminárias

Fonte: Os autores.

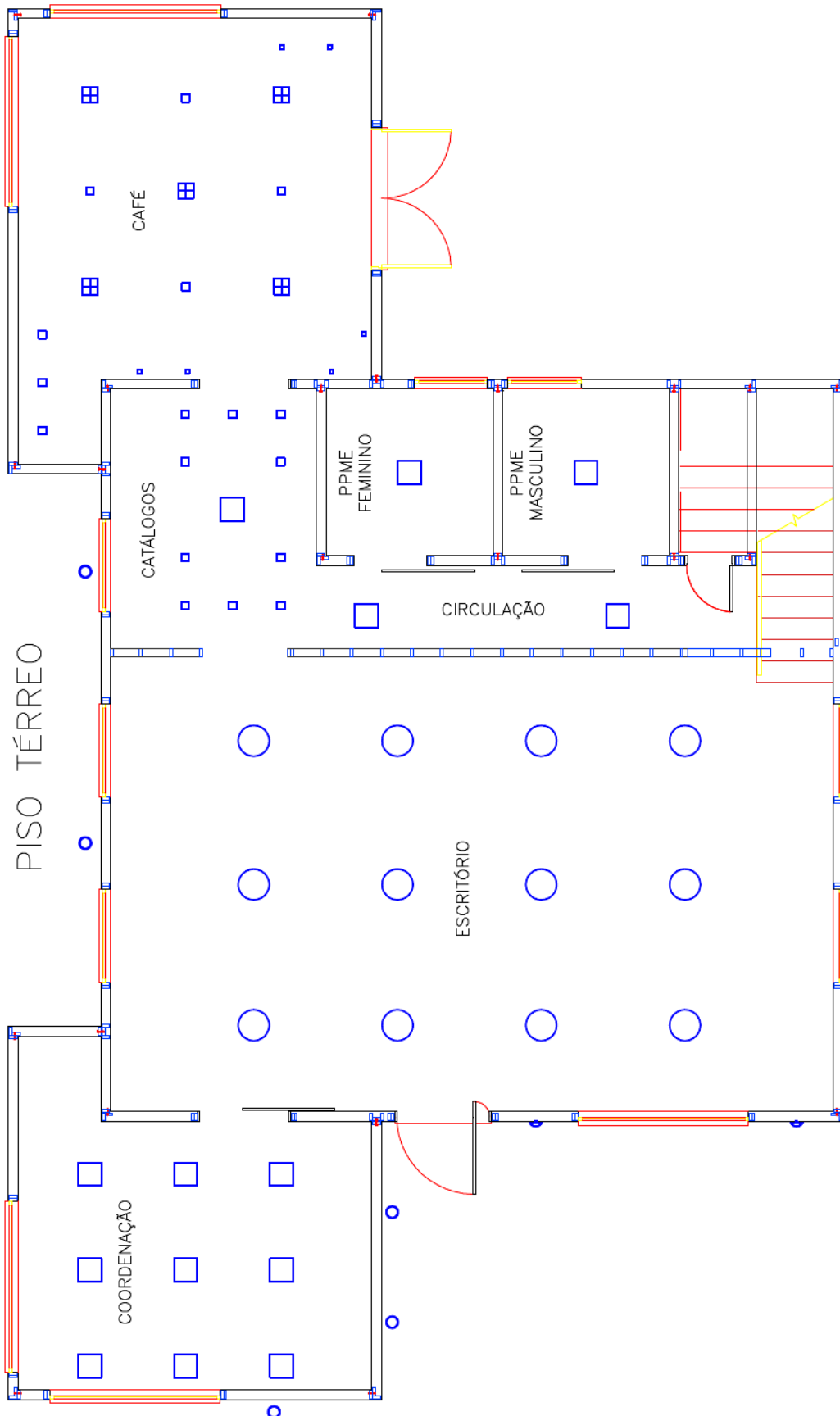


Figura 114 - Disposição das luminárias (Térreo)

Fonte: Os autores.

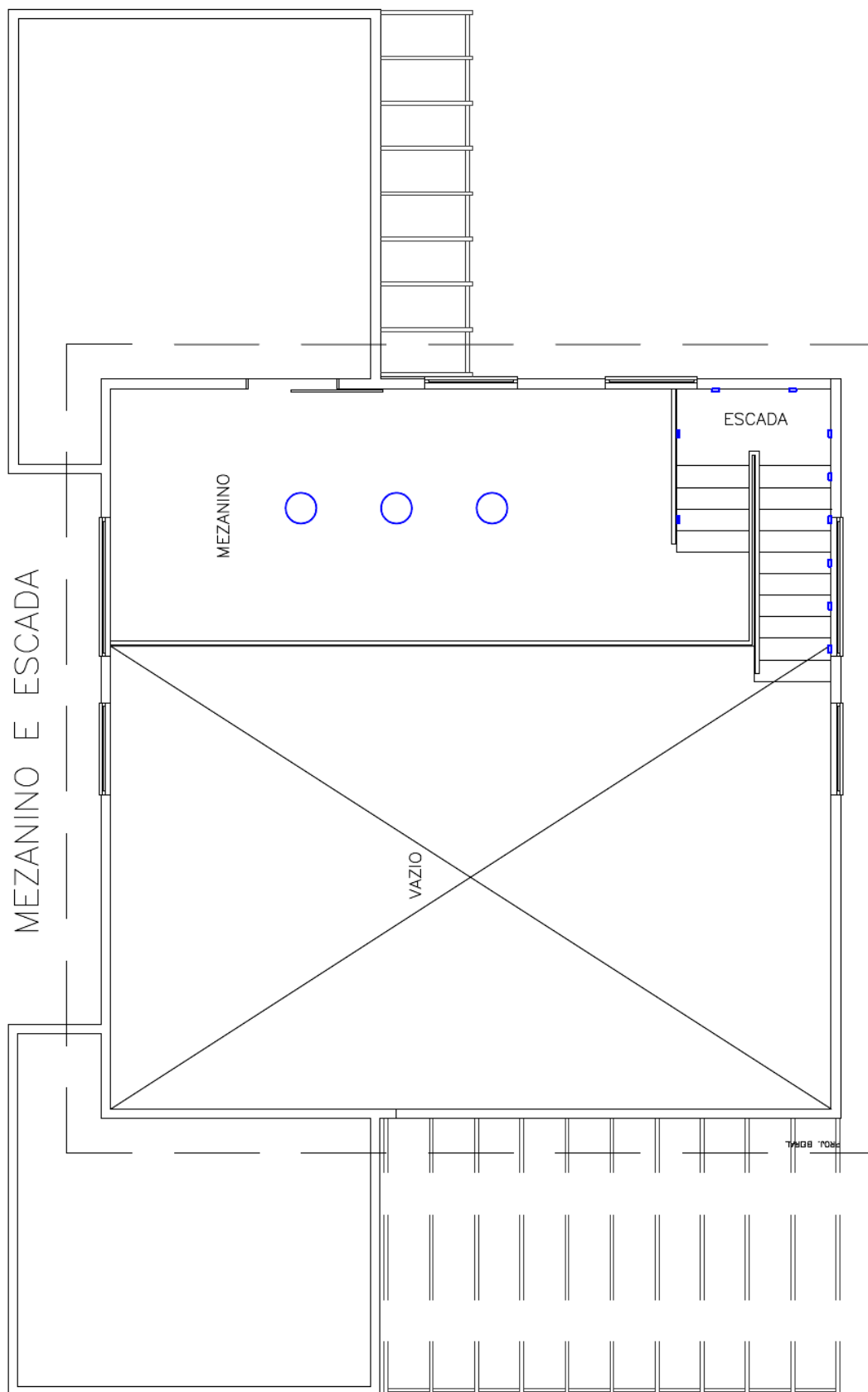


Figura 115 - Disposição das luminárias (escada e mezanino)

Fonte: Os autores.

7.2 CÁLCULO LUMINOTÉCNICO DO EV

Para realização do cálculo luminotécnico são necessários alguns critérios principais, como: a quantidade de luz necessária para o ambiente, o equilíbrio da iluminação, o ofuscamento que o ambiente proporciona e a reprodução das cores.

A cada um destes critérios deve ser dada a maior atenção, pois estão diretamente relacionados com as necessidades visuais, conforto visual e, portanto, o bem estar humano.

Ao iniciar um projeto luminotécnico devem ser feitas opções preliminares, ou seja, escolher o tipo de iluminação mais adequada (incandescente, fluorescente, LED, etc.) o tipo de luminária (direta, semi-direta, etc.), sendo que estas opções envolvem aspectos de decoração, tipo do local (sala, escritório, loja, etc.) e as atividades que serão desenvolvidas (trabalho bruto de maquinaria, montagem, leitura, etc.).

Tendo em vista tais características e a proposta inicial do Escritório Verde, toda a iluminação da sala mais ampla será do tipo pendente, modelo PD44-P33LED4K, conforme a Figura 116. A coordenação utiliza o modelo EF35-E24LED4K, conforme a Figura 117. Estes ambientes foram utilizados como referência para realização dos cálculos luminotécnicos, e para efeito de comparação a sala da coordenação será utilizada.

Conforme demonstrado nas Figuras 114 e 115, as salas do café e dos catálogos apresentam iluminação por mais de um tipo de luminária e distribuição não simétrica, não sendo possível a utilização do método de verificação apresentado pela NBR 5382 (1985) e, conseqüentemente, inviabiliza o cálculo.

O ambiente da circulação, assim como o dos banheiros utilizam luminárias modelo EF35-E24LED4K e o mezanino utiliza luminárias modelo PD44-P33LED4K, cuja avaliação será realizada em outras áreas do EV.

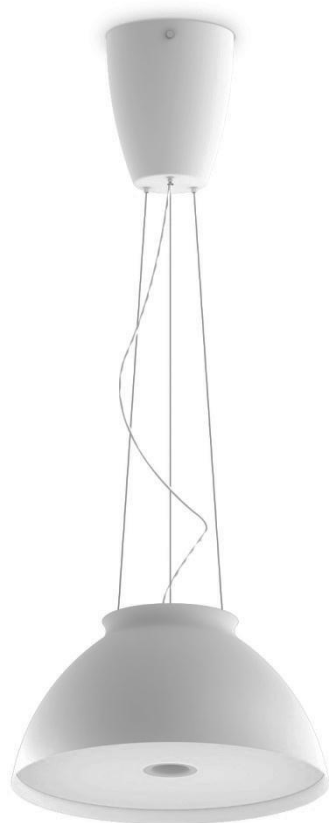


Figura 116 - Luminária pendente PD44-P33LED4K
Fonte: LUMIDEC (2012).

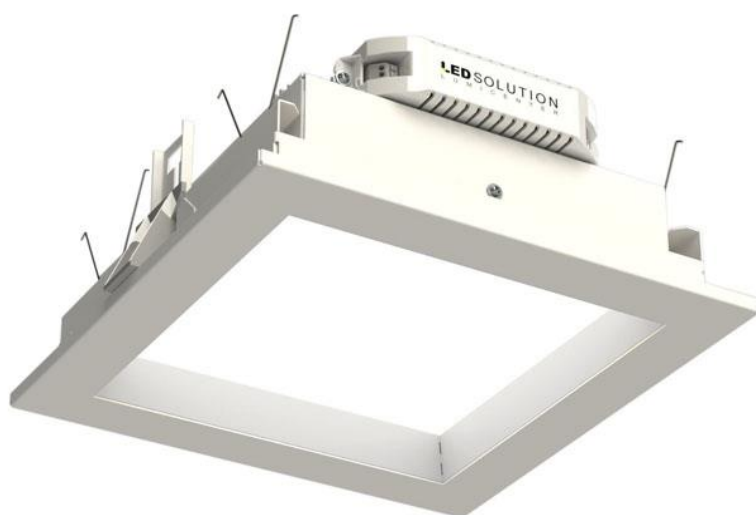


Figura 117 - Luminária pendente EF35-E
Fonte: LUMIDEC (2012).

7.2.1 Método de Lumens

Este método parte das seguintes premissas:

- quando se considera a iluminação de um compartimento, interessa especialmente conhecer o iluminamento médio no chão, mas, quando se tratar de salas de trabalho, deve-se considerar o iluminamento médio no plano de trabalho (mesas, bancada, máquinas, etc.). A Norma Brasileira NBR 5413 (1992) apresenta uma tabela com valores dos índices de iluminamento requeridos para cada grupo A, B e C de tarefas visuais mais comuns. Na referida Norma, o índice de iluminamento tem a designação de iluminância e é expresso em lux, conforme a Tabela 24.

Tabela 24 – Iluminâncias por classes de tarefas visuais

| Grupo | | Iluminância (lux) | Tipo de Atividade |
|-------|--|-----------------------|--|
| A | Iluminância geral para áreas usadas interruptamente ou com tarefas visuais simples | 20 - 30 - 50 | Áreas públicas com arredores escuros |
| | | 50 - 75 - 100 | Orientação simples para permanência curta |
| | | 100 - 150 - 200 | Recintos não usados para trabalho contínuo; depósitos |
| | | 200 - 300 - 500 | Tarefas com requisitos visuais limitados, trabalho bruto de maquinaria, auditórios |
| B | Iluminação geral para área de trabalho | 500 - 750 - 1000 | Tarefas com requisitos visuais normais, trabalho médio de maquinaria, escritórios |
| | | 1000 - 1500 - 2000 | Tarefas com requisitos especiais, gravação manual, inspeção, indústria de roupas |
| C | Iluminação adicional para tarefas visuais difíceis | 2000 - 3000 - 5000 | Tarefas visuais exatas e prolongadas, eletrônica de tamanho pequeno |
| | | 5000 - 7500 - 10000 | Tarefas visuais muito exatas, montagem de microeletrônica |
| | | 10000 - 15000 - 20000 | Tarefas visuais muito especiais, cirurgia |

Fonte: Adaptada da NBR 5413 (1992).

Para a escolha da “iluminância” constante na tabela anterior, segundo a NBR 5413, deve-se analisar cada característica para determinar o seu peso,

conforme a Tabela 25. Somar os três valores encontrados algebricamente, considerando o sinal e, assim, usar a iluminância inferior do grupo, quando o valor total for igual a -2 ou -3. Utilizar a iluminância superior, quando a soma for +2 ou +3. Por fim, a iluminância média, nos outros casos.

Tabela 25 – Fatores determinantes da iluminância adequada

| Característica da tarefa do observador | Peso | | |
|--|--------------------|--------------|--------------------|
| | -1 | 0 | 1 |
| Idade dos ocupantes | Inferior a 40 anos | 40 a 55 anos | Superior a 55 anos |
| Velocidade e precisão | Sem importância | Importante | Crítica |
| Refletância do fundo de tarefa | Superior a 70% | 30 a 70% | Inferior a 30% |

Fonte: Adaptada da NBR 5413 (1992).

- em um compartimento contendo uma ou várias fontes luminosas, há emissão de um fluxo luminoso e apenas parte desse fluxo atinge diretamente o plano de trabalho ou o plano do chão. Parte deste é absorvido/refletido pelo teto, paredes e objetos localizados no local. Assim, o fluxo total para iluminar o plano de trabalho é dado pela expressão 29, ao passo que a expressão 30 permite o cálculo do número de luminárias (ver item 5.2.6).

$$\phi = \frac{SE}{ud} \quad (29)$$

$$\phi = \eta\varphi \quad (30)$$

onde:

ϕ = fluxo luminoso total, em lumens;

S = área do recinto, em metros quadrados;

E = nível de iluminamento, em luxes;

u = fator de utilização ou coeficiente de utilização;

d = fator de depreciação ou de manutenção;

η = número de luminárias;

φ = fluxo por luminárias, em lumens.

O coeficiente de utilização u sempre será inferior a 1, pois é a razão entre o fluxo utilizado e o fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas.

Para o fator de depreciação deve-se utilizar a Tabela 26.

Tabela 26 – Fatores de depreciação

| Ambiente | Período de manutenção | | |
|----------|-----------------------|--------|--------|
| | 2500 h | 5000 h | 7500 h |
| Limpo | 0,95 | 0,91 | 0,88 |
| Normal | 0,91 | 0,85 | 0,8 |
| Sujo | 0,8 | 0,66 | 0,57 |

Fonte: Adaptada de CREDER (2013).

Os fatores de reflexão são obtidos de acordo com a Tabela 27.

Tabela 27 – Fatores de reflexão

| | |
|-----------------------------|-----|
| Teto branco | 75% |
| Teto claro | 50% |
| Paredes brancas | 50% |
| Paredes claras | 30% |
| Paredes medianamente claras | 10% |

Fonte: Adaptada de CREDER (2013).

Além desses dados, é necessário calcular o índice do local, que é obtido de acordo com a equação 46.

$$K = \frac{L.C}{(L+C).A} \quad (46)$$

onde:

K : índice local;

L : largura do ambiente;

C : comprimento do ambiente;

A : altura de montagem.

Para o salão principal e para a sala da coordenação do Escritório Verde, por serem salas mais amplas e destinadas à reuniões e palestras, a iluminância deve estar entre 500 – 750 – 1000 lux, segundo a Tabela 24. Como as atividades não requerem tanta velocidade e precisão e o local apresenta uma boa refletância, o valor da iluminância média deverá ser 500 lux.

7.2.2 Cálculo do fluxo total necessário para o salão principal do EV

Analisando os dados obtidos e utilizando a luminária PD44-P33LED4K como referência, temos:

$$S = 55,0715 \text{ m}^2;$$

$$E = 500 \text{ lux};$$

$$d = 0,95;$$

$$L = 9,35 \text{ m};$$

$$C = 5,89 \text{ M};$$

u = necessita ser calculado.

Aplicando estes valores na equação 46 temos que o índice local é de aproximadamente:

$$K = \frac{9,35 \cdot 5,89}{(9,35 + 5,89) \cdot 3}$$

$$K = 1,2045$$

Tendo como referência, teto branco e paredes claras, o fator de utilização é 0,8, conforme indicação do fabricante.

$$u = 0,8.$$

Aplicando os dados na equação 29, tem-se que:

$$\phi = \frac{55,0715.500}{0,95.0,8}$$

$$\phi = 36231,25 \text{ lm}$$

Assim, como estão instaladas 12 luminárias, o fluxo unitário deverá ser superior a 3019 lumens.

Como a Lumidec, fabricante da luminária, não informou o fluxo luminoso emitido por luminária, as comparações não poderão ser feitas para este ambiente, cabe apenas analisar a medição luminotécnica apresentada na Tabela 29.

7.2.3 Cálculo do fluxo total necessário para a sala da coordenação do EV

Analisando os dados obtidos e utilizando a luminária EF35-E24LED4K como referência, temos:

$$S = 15,86 \text{ m}^2;$$

$$E = 500 \text{ lux};$$

$$d = 0,95;$$

$$L = 4,57 \text{ m};$$

$$C = 3,47 \text{ m};$$

u = necessita ser calculado.

Aplicando estes valores na equação 46 tem-se que o índice local é de aproximadamente:

$$K = \frac{4,57.3,47}{(4,57+3,47).2,4}$$

$$K = 0,8218231$$

Como muitos fabricantes utilizam “RCR” como índice do ambiente, deve-se calculá-lo através da seguinte equação:

$$RCR = \frac{5.A.(L+C)}{L.C} \quad (47)$$

Assim o valor do RCR será 6.

Analisando os valores fornecidos pelo fabricante e utilizando teto branco e paredes claras como referência tem-se que o fator de utilização é 0,62, conforme mostra a Figura 118.

| EF35-E12LED | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Teto (%) | 70 | | | 50 | | | 30 | | | 0 |
| Parede (%) | 50 | 30 | 10 | 50 | 30 | 10 | 50 | 30 | 10 | 0 |
| Chão (%) | 20 | | | 20 | | | 20 | | | 0 |
| RCR | Fator de Utilização (%) | | | | | | | | | |
| 0 | 121 | 121 | 121 | 115 | 115 | 115 | 111 | 111 | 111 | 104 |
| 1 | 108 | 105 | 102 | 104 | 101 | 98 | 100 | 98 | 96 | 91 |
| 2 | 96 | 90 | 85 | 92 | 88 | 83 | 89 | 85 | 82 | 78 |
| 3 | 85 | 78 | 73 | 82 | 76 | 71 | 80 | 74 | 70 | 67 |
| 4 | 76 | 69 | 62 | 74 | 67 | 62 | 71 | 66 | 61 | 58 |
| 5 | 69 | 61 | 54 | 67 | 59 | 54 | 65 | 58 | 53 | 51 |
| 6 | 62 | 54 | 48 | 60 | 53 | 48 | 59 | 52 | 47 | 45 |
| 7 | 57 | 49 | 43 | 55 | 48 | 42 | 54 | 47 | 42 | 40 |
| 8 | 52 | 44 | 38 | 51 | 43 | 38 | 49 | 43 | 38 | 36 |
| 9 | 48 | 40 | 35 | 47 | 40 | 34 | 46 | 39 | 34 | 32 |
| 10 | 44 | 37 | 32 | 43 | 36 | 31 | 42 | 36 | 31 | 29 |

Figura 118 - Fator de utilização para a luminária EF35-3

Fonte: LUMIDEC (2012).

Obtem-se $u = 0,62$.

Aplicando os dados na equação 29, tem-se que:

$$\phi = \frac{15,86.500}{0,95.0,62}$$

$$\phi = 13461,71 \text{ lumens}$$

Assim, como estão instaladas 9 luminárias, o fluxo unitário deverá ser superior a 1495 lumens.

Cada luminária EF35-E24LED4K é capaz de emitir 1500 lumens, conforme a Tabela 28, o que viabiliza sua instalação a fim de se obter a luminosidade esperada no ambiente.

Tabela 28 – Fatores de reflexão das luminárias EF35-E

| CÓDIGO | L1 | L2 |
|----------------------|----------------|---------------|
| EF35-E12LED4K | 14W LED | 700lm |
| EF35-E12LED3K | 14W LED | 700lm |
| EF35-E24LED4K | 26W LED | 1500lm |
| EF35-E24LED3K | 26W LED | 1500lm |

Fonte: Adaptada de LUMIDEC (2012).

7.3 MEDIÇÃO LUMINOTÉCNICA

Ao vigésimo segundo dia do mês de janeiro de 2013, foi realizada uma medição luminotécnica, para averiguar a iluminação apresentada pelas luminárias LED no EV. Para evitar a influencia da iluminação natural, a medição foi realizada no período noturno e avaliando cada sala separadamente, sendo elas a sala da coordenação, o escritório, sala do café e a sala dos catálogos, conforme apresentado na Figura 114.

7.3.1 Metodologia

Conforme especifica a NBR 5382 (1985) – Verificação de iluminância de interiores, norma que fixa o modo pelo qual se faz a verificação da iluminância de interiores de áreas retangulares proveniente da iluminação geral, a medição da

iluminância de interiores deve ser realizada por meio de um instrumento com fotocélula com correção de cosseno, correção de cor e temperatura ambiente entre 15°C e 50°C, a uma altura de 80 cm do chão do local.

Foram escolhidas duas áreas do EV para verificar a iluminância, devido a utilização de luminárias em um padrão simétrico com apenas um tipo de luminária.

Foi utilizado um instrumento digital portátil da Minipa, modelo MLM-1011, com LCD de 3 ½ dígitos, precisão básica 4% da leitura, com mudança de faixa manual, resposta espectral fotópica CIE, sensor tipo foto diodo de silício e valor corrigido pela regra do cosseno, apresentado na Figura 119. Este realiza medidas de iluminação ambiente em lux nas faixas de 2000/20000/100000 lux.



Figura 119 - Luxímetro digital

Fonte: Os autores.

Para determinar a iluminância média em um campo de trabalho retangular, com fontes de luz em padrão regular, simetricamente espaçadas em duas ou mais fileiras. A NBR 5382 (1985) orienta por meio das seguintes proposições, em conjunto com a Figura 120, a metodologia do cálculo:

- fazer leituras nos lugares r1, r2, r3 e r4, para uma área típica central. Repetir nos locais r5, r6, r7 e r8. Calcular a média aritmética das oito medições, obtendo o valor de R na equação 48;
- fazer leituras nos lugares q1, q2, q3 e q4, em duas meias áreas típicas, em cada lado do recinto. Calcular a média aritmética das quatro leituras obtendo o valor de Q na equação 48;
- fazer leituras nos quatro locais t1, t2, t3 e t4 e calcular a média aritmética obtendo o valor de T na equação 48;
- fazer leituras nos dois lugares p1 e p2 em dois cantos típicos e calcular a média aritmética das duas leituras, obtendo o valor de P na equação 48.

$$E_{média} = \frac{R.(N-1).(M-1) + Q.(N-1) + T.(M-1) + P}{N.M} \quad (48)$$

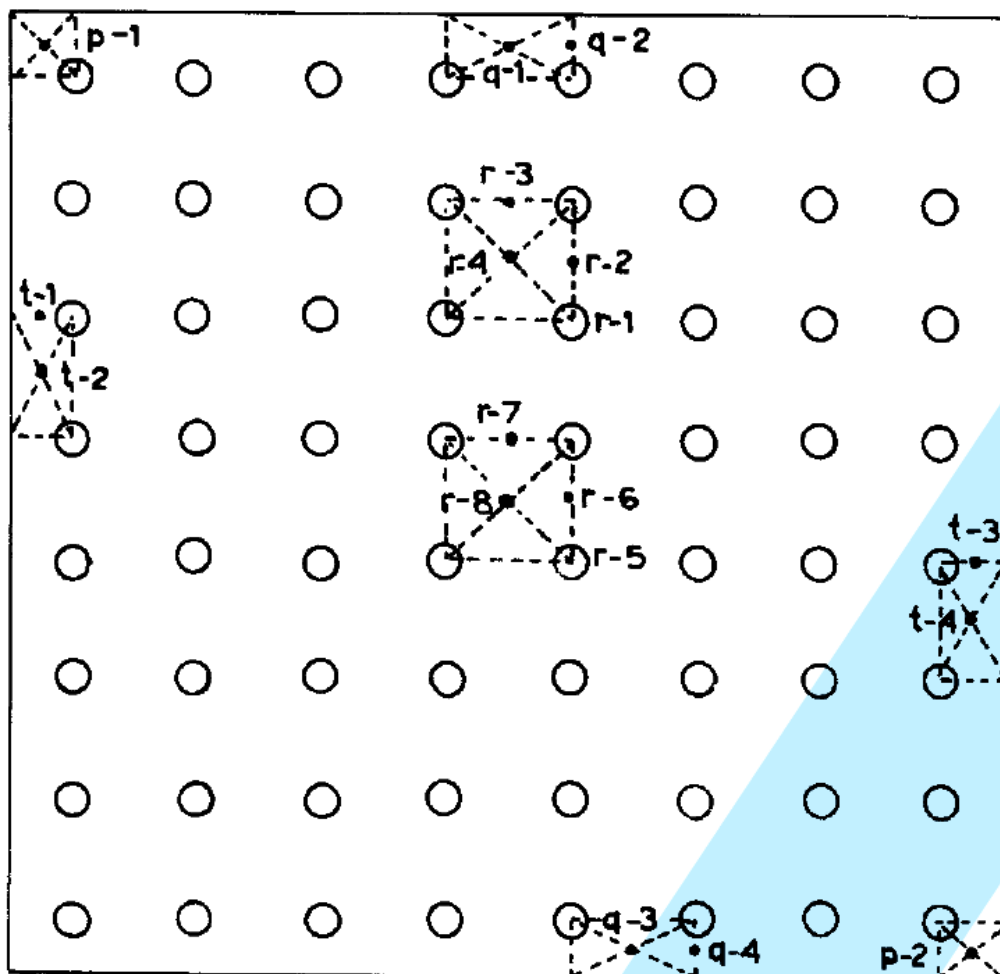


Figura 120 - Campo de trabalho retangular, iluminado com fontes de luz em padrão regular
Fonte: NBR 5382 (1985).

7.3.2 Resultados

As Tabelas 29 e 30, mostram os valores coletados, em lux, para o salão principal e a coordenação. As células marcadas em amarelo representam o local logo abaixo das luminárias. A célula em laranja representa a luminária que apresentava um defeito no funcionamento.

As Tabelas 31 e 32 trazem os valores coletados, em lux, no café e na sala de catálogos, respectivamente, e mostram os valores coletados no centro da sala, assim como nas laterais e cantos das salas. Os valores marcados em verde se referem à medições sobre o balcão da sala do café e na frente do rack da sala dos catálogos.

Tabela 29 - Medição no salão principal

| | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 180 | 170 | 190 | 240 | 180 | 220 | 160 |
| 260 | 330 | 400 | 420 | 410 | 350 | 230 |
| 320 | 390 | 430 | 460 | 450 | 390 | 310 |
| 321 | 415 | 488 | 480 | 485 | 460 | 360 |
| 340 | 380 | 460 | 480 | 465 | 440 | 350 |
| 320 | 415 | 460 | 480 | 460 | 460 | 340 |
| 280 | 340 | 370 | 410 | 390 | 380 | 315 |
| 250 | 320 | 285 | 300 | 315 | 320 | 290 |
| 130 | 140 | 185 | 185 | 190 | 140 | 120 |

Fonte: Os autores.

Tabela 30 - Medição na coordenação

| | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 440 | 500 | 590 | 520 | 640 | 490 |
| 510 | 660 | 730 | 790 | 740 | 600 |
| 700 | 760 | 800 | 810 | 780 | 700 |
| 760 | 760 | 840 | 830 | 800 | 670 |
| 740 | 800 | 750 | 830 | 780 | 600 |
| 700 | 730 | 700 | 670 | 570 | 550 |
| 470 | 460 | 495 | 480 | 445 | 360 |

Fonte: Os autores.

Tabela 31 - Medição no café

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 191 | 443 | 172 | 90 |
| | 89 | 350 | 133 |
| | 89 | 57 | 138 |

Fonte: Os autores.

Tabela 32 - Medição na sala de catálogos

| | | |
|-----|-----|-----|
| 98 | 211 | 311 |
| 131 | 340 | 227 |
| 56 | 254 | 118 |

Fonte: Os autores.

Empregando a metodologia de cálculo apresentada pelo item 7.3.1, obtêm-se os seguintes parâmetros para o salão principal:

$$R = 459;$$

$$Q = 199;$$

$$T = 328;$$

$$P = 148.$$

onde:

N = luminárias por fila;

M = número de filas.

Aplicando estes valores na equação 48, resulta em:

$$E_{média} = \frac{459.(4-1).(3-1) + 199.(4-1) + 328.(3-1) + 148}{4.3}$$

$$E_{média} = 346,212$$

Logo, a iluminância média medida no salão principal é de 346,2 lux.

Ao empregar a mesma metodologia de cálculo na sala de coordenação, obtêm-se os seguintes parâmetros:

$$R = 803;$$

$$Q = 516;$$

$$T = 700;$$

$$P = 440.$$

Aplicando estes valores na equação 48, resulta em:

$$E_{média} = \frac{803.(3-1).(3-1) + 516.(3-1) + 700.(3-1) + 440}{3.3}$$

$$E_{média} = 675,833$$

Logo, a iluminância média medida para a sala da coordenação é de 675,8 lux.

7.4 SIMULAÇÃO LUMINOTÉCNICA

7.4.1 Utilização do *Software* Softlux 2.2

Utilizando o *software* gratuito Softlux 2.2 da Itaim Iluminação (disponível em <http://www.itaamiluminacao.com.br/servicos/downloads>, após cadastramento no site) simulações luminotécnicas foram realizadas para avaliar a eficiência das luminárias utilizadas na sala da coordenação.

A simulação é feita em quatro passos. O primeiro passo é a identificação do ambiente e indicação de seus parâmetros. Como parâmetros iniciais o programa pede as dimensões do ambiente, comprimento, largura, pé direito, plano de trabalho e altura de suspensão das luminárias. As cores de refletância média também são requisitadas, condições do ambiente e tipo de atividade realizada, conforme a Figura 121.

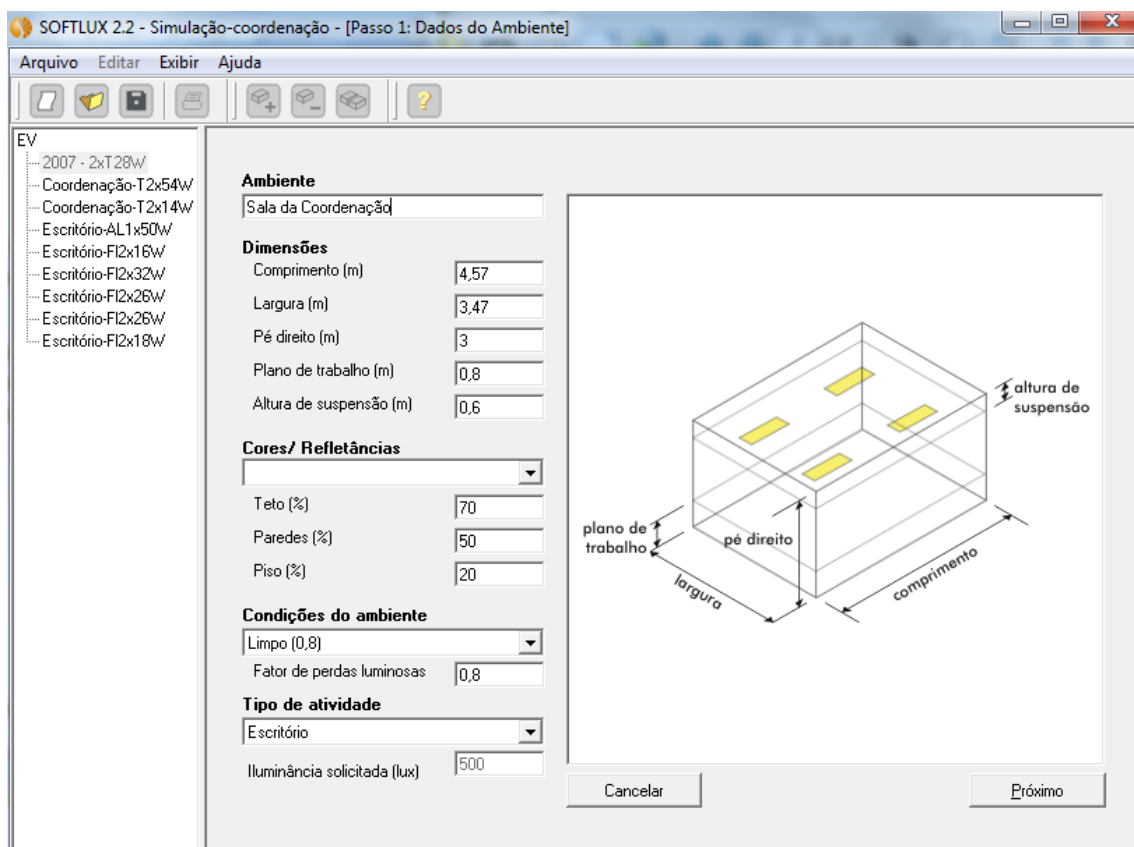


Figura 121 - Simulação Luminotécnica – Dados do Ambiente

Fonte: SOFTLUX 2.2.

O segundo passo é a seleção da luminária. O usuário pode analisar os diferentes tipos de luminárias fabricados pela Itaim, comparando suas especificações técnicas, bem como seu fluxo luminoso, além de restringir a lista de produtos, digitando o modelo ou código da luminária; selecionando o tipo de luminária, o tipo de lâmpada desejada ou o tipo de instalação conforme a Figura 122.

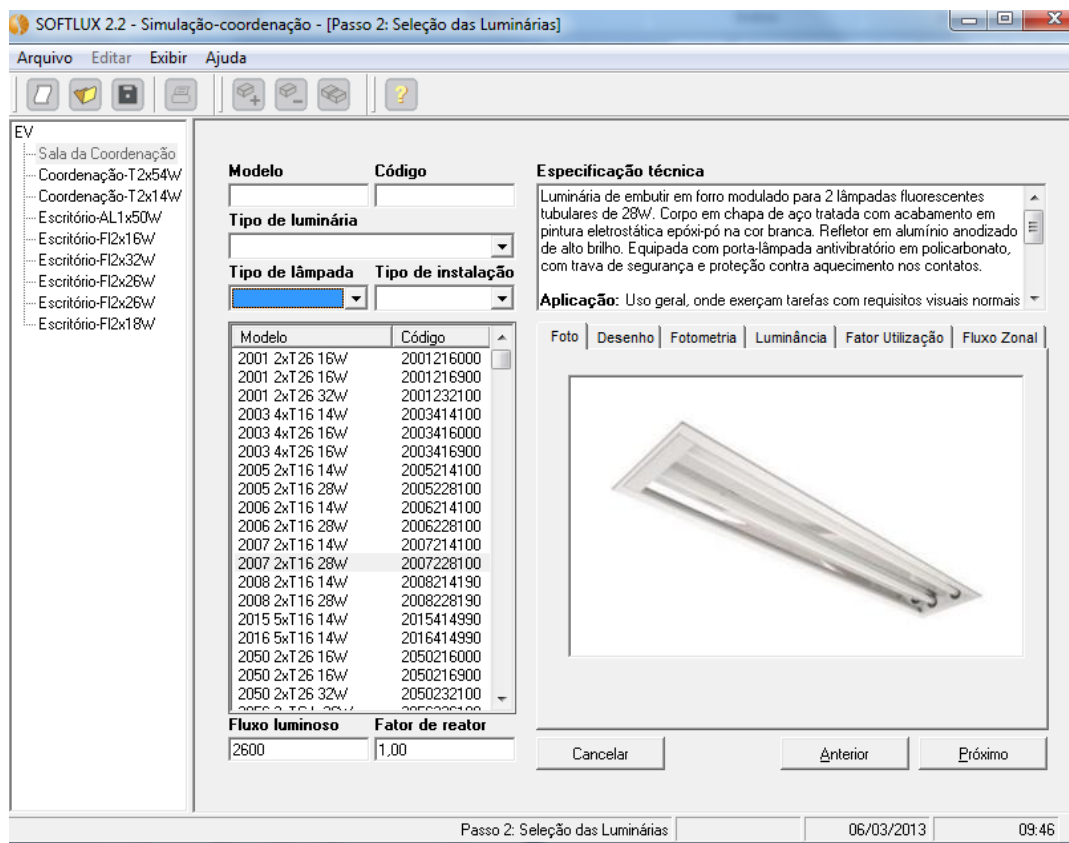


Figura 122 - Simulação Luminotécnica – Escolha da Luminária

Fonte: SOFTLUX 2.2.

Escolhida a luminária desejada o próximo passo é informar o parâmetro de projeto a ser adotado no cálculo luminotécnico. Caso o campo “Tipo de atividade” tenha sido preenchido no Passo 1, o campo “Iluminância (lux)” estará preenchido com o nível de iluminância recomendado para a atividade. Caso esse campo não tenha sido preenchido, o programa adotará como iluminância padrão para cálculo 500 lux. O usuário poderá alterar a quantidade de luminárias inserindo o valor desejado no campo “Número de luminárias”, conforme a Figura 123, as quantidades e distâncias entre colunas e linhas, as distâncias entre parede-coluna e parede-linha de luminárias e rotacionar a luminária em 0° ou 90°.

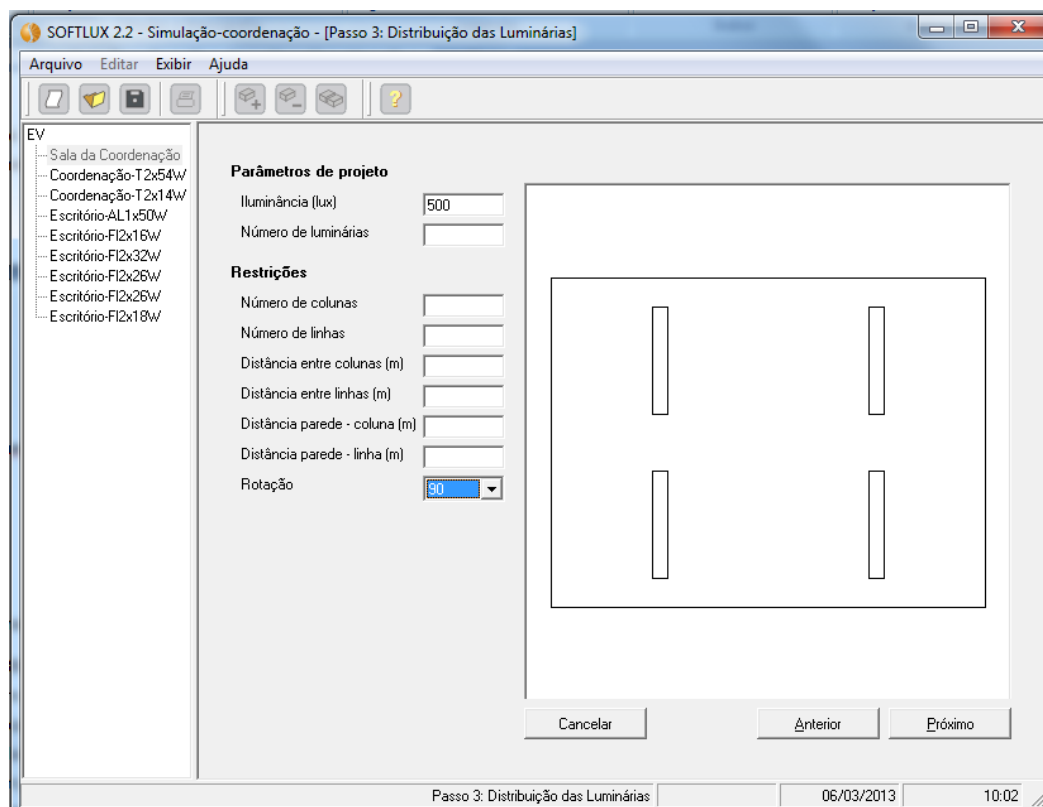


Figura 123 - Simulação Luminotécnica – Parâmetros de projeto

Fonte: SOFTLUX 2.2.

Com todos os parâmetros, o software calcula o nível médio de iluminação por meio do Método das Cavidades Zonais (E_{mcz}) e os níveis de iluminância médio ($E_{méd}$), máximo ($E_{máx}$) e mínimo ($E_{mín}$) do ambiente em questão, usando o Método Ponto a Ponto. Nota-se que os valores médios do Método das Cavidades Zonais e Ponto a Ponto, poderão ser bem distintos entre si, uma vez que o primeiro considera as inter-reflexões da luz no teto, paredes e piso e considera uma distribuição uniforme das luminárias.

O Método Ponto a Ponto, entretanto, além de considerar apenas o fluxo direto das luminárias (não considera inter-reflexões) considera a média de níveis de iluminância em pontos distribuídos homogeneamente em função de qualquer posição das luminárias. Desta forma, luminárias com fluxo indireto ou luminárias com fluxo direto-indireto apresentarão resultados muito aquém do esperado utilizando o Método Ponto a Ponto.

Como resultado, serão apresentados alguns níveis de iluminância em pontos fixos do ambiente, conforme a Figura 124.

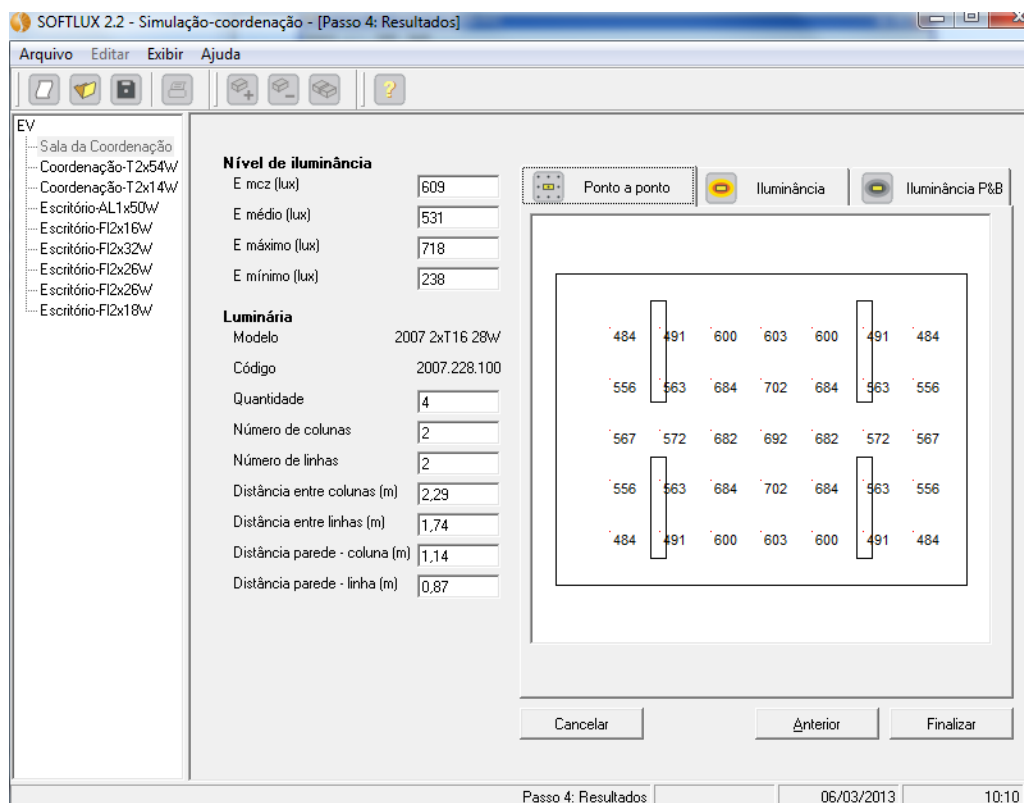


Figura 124 - Simulação Luminotécnica – Resultado

Fonte: SOFTLUX 2.2.

Serão apresentados também os níveis de iluminância em uma escala de cores, conforme a Figura 125.

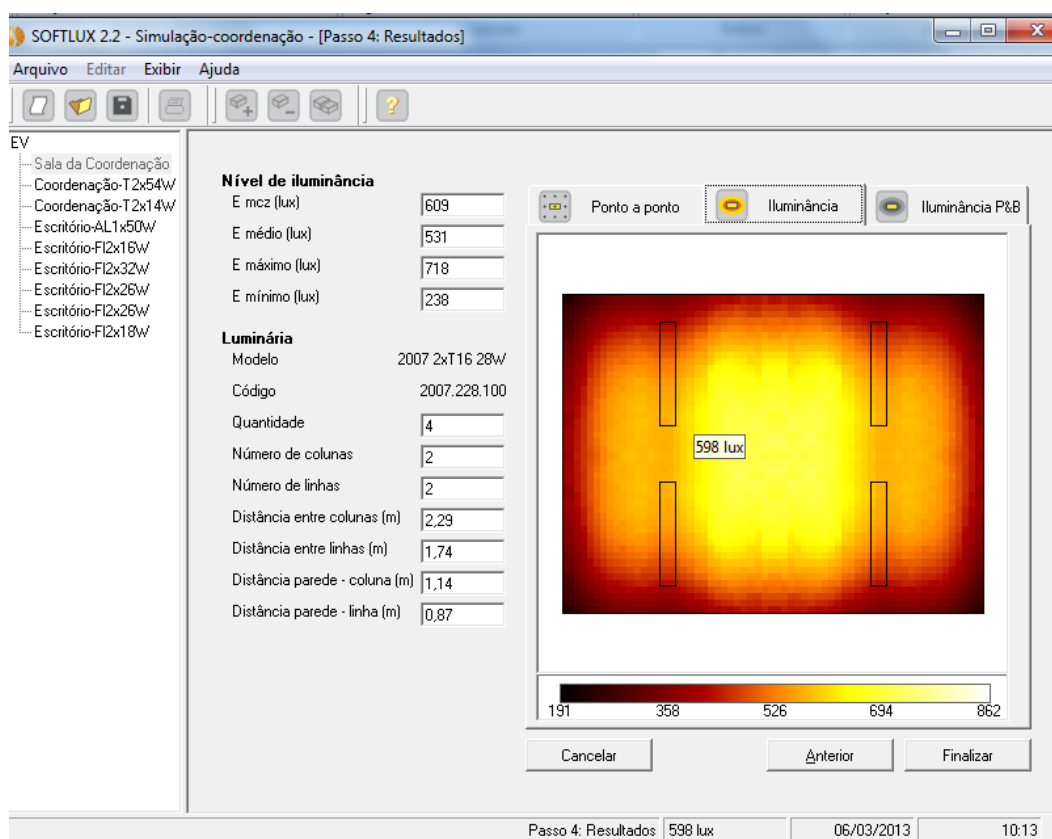


Figura 125 - Simulação Luminotécnica – Resultado a
Fonte: SOFTLUX 2.2.

7.4.2 Simulações

A Tabela 33 apresenta algumas especificações técnicas e o resumo das simulações realizadas para o ambiente da coordenação do EV.

Tabela 33 - Resumo da simulação luminotécnica

| Ambiente | Luminária | Código | Qtde | Emcz (lux) | Eméd (lux) | Emáx (lux) | Emín (lux) |
|--|----------------------|---------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Sala da Coordenação - 2007 2xT16 32W | 2007 2xT16 28W | 2.007.228.100 | 4 | 609 | 531 | 718 | 238 |
| Sala da Coordenação - 3450 2xT16 54W | 3450 2xT16 54W | 3.450.228.500 | 2 | 467 | 494 | 774 | 99 |
| Sala da Coordenação - 3416 2xT16 14W | 3416 2xT16 14W | 3.416.214.500 | 8 | 494 | 395 | 570 | 176 |
| Sala da Coordenação - Ipenum1xQR11 1 50W | Ipenum1xQR11 50W | 8033.1B3.300 | 24 | 531 | 516 | 764 | 217 |
| Sala da Coordenação - Itaberaba 2xTC-D 18W | Itaberaba 2xTC-D 18W | 8273.2C2.110 | 12 | 494 | 411 | 565 | 186 |
| Sala da Coordenação - Itaberaba 2xTC-D 26W | Itaberaba 2xTC-D 26W | 8273.2C3.110 | 8 | 494 | 422 | 587 | 182 |
| Sala da Coordenação - Lazulita 2xTC-D 26W | Lazulita 2xTC-D 26W | 8140.2C3.100 | 6 | 534 | 450 | 632 | 213 |
| Sala da Coordenação - Opala 2xTC-D 26W | Opala 2xTC-D 26W | 8017.2C3.110 | 6 | 414 | 368 | 522 | 152 |
| Sala da Coordenação - Rubi 2xTC-D 18W | Rubi 2xTC-D 18W | 8014.2C2.100 | 8 | 504 | 450 | 685 | 202 |

Fonte: Os autores.

7.4.2.1 Luminária 2007 2xT16 28W

A luminária 2007 2xT16 28W é de embutir em forro de gesso ou modulado com perfil "T" de aba 25 mm. Apresenta corpo em chapa de aço tratada com acabamento em pintura eletrostática na cor branca e refletor em alumínio anodizado de alto brilho (reflexão total de 86%). É equipada com porta-lâmpada antivibratório em policarbonato, com trava de segurança e proteção contra aquecimento nos contatos, conforme a Figura 126.

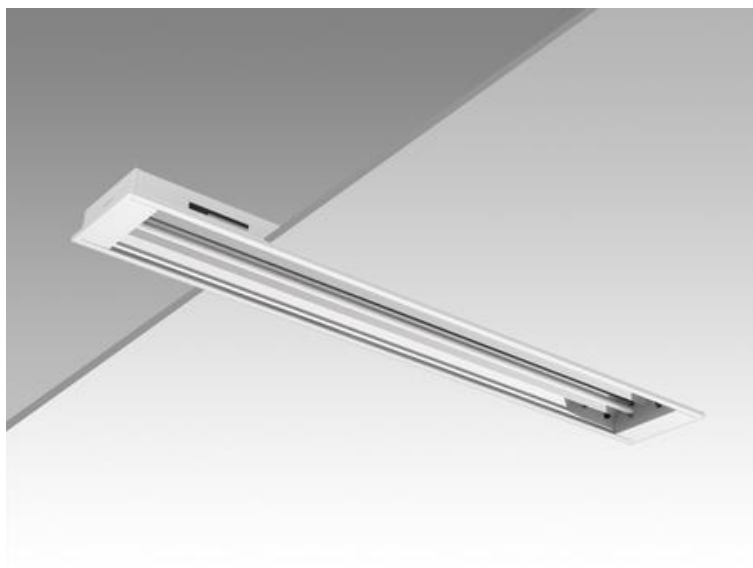


Figura 126 - Luminária 2007 2xT16 28W

Fonte: ITAIM (2013).

luminária: 2007 2xT16 28W Código: 2007.228.100;

iluminância solicitada: 500 lux;

quantidade: 4, conforme a Figura 127;

número de colunas: 2;

número de linhas: 2;

distância entre colunas: 2,29 m;

distância entre linhas: 1,74 m;

distância parede-colunas: 1,14 m;

distância parede-linhas: 0,87 m;

fluxo luminoso: 2600 lm.

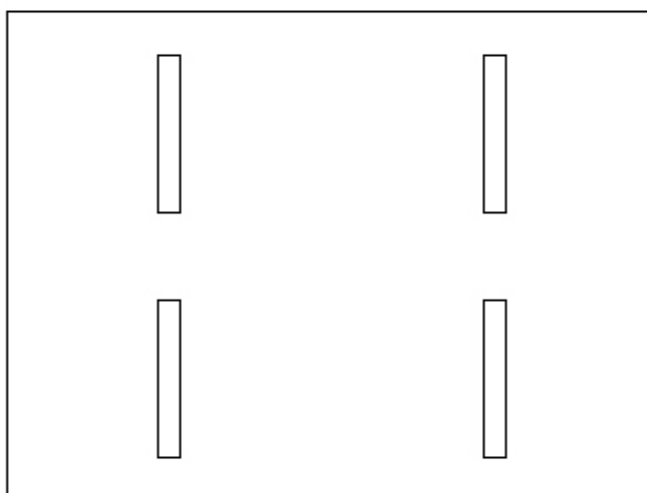


Figura 127 - Distribuição das luminárias 2007 2xT16 28W
Fonte: SOFTLUX 2.2.

Conforme a Figura 128 e a Figura 129, tem-se como resultado os valores de E (Iluminância):

E médio: 531 lux;

E máximo: 718 lux;

E mínimo: 238 lux;

E mcz (método das cavidades zonais): 609 lux.

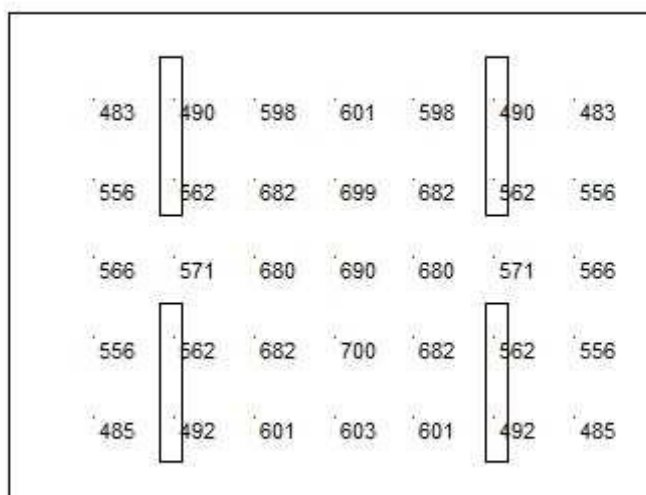


Figura 128 - Método ponto a ponto: primeiro caso
Fonte: SOFTLUX 2.2.

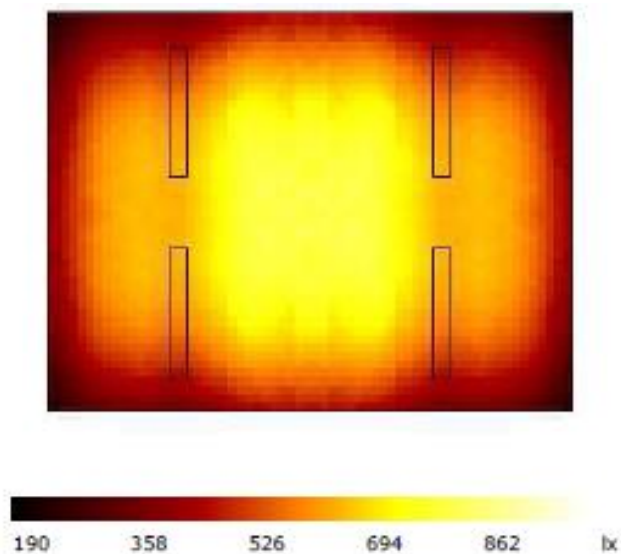


Figura 129 - Iluminância: primeiro caso

Fonte: SOFTLUX 2.2.

7.4.2.2 Luminária 3450 2xT16 54W

A Luminária 3450 2xT16 54W pendente apresenta Corpo em chapa de aço tratada com acabamento em pintura eletrostática na cor branca e refletor e aletas parabólicas em alumínio anodizado de alto brilho (reflexão total de 86%). Alojamento do reator no próprio corpo e suspensão por cabos de aço. Equipada com porta-lâmpada antivibratório em policarbonato, com trava de segurança e proteção contra aquecimento nos contatos, conforme a Figura 130.

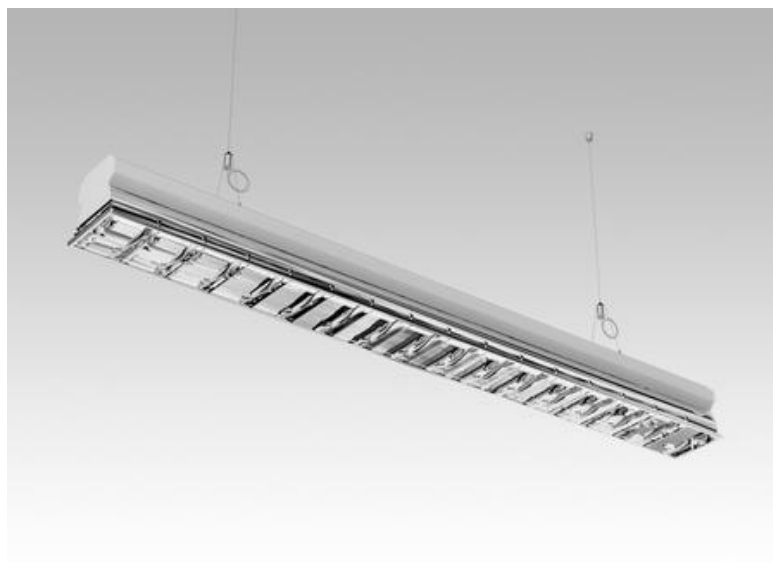


Figura 130 - Luminária 3450 2xT16 54W

Fonte: ITAIM (2013).

luminária: 3450 2xT16 54W;

código: 3450.228.500;

iluminância solicitada: 500 lux;

quantidade: 2, conforme a Figura 131;

número de colunas: 2;

número de linhas: 1;

distância entre colunas: 2,29 m;

distância parede-colunas: 1,14 m;

distância parede-linhas: 1,74 m;

fluxo luminoso: 4450 lm.

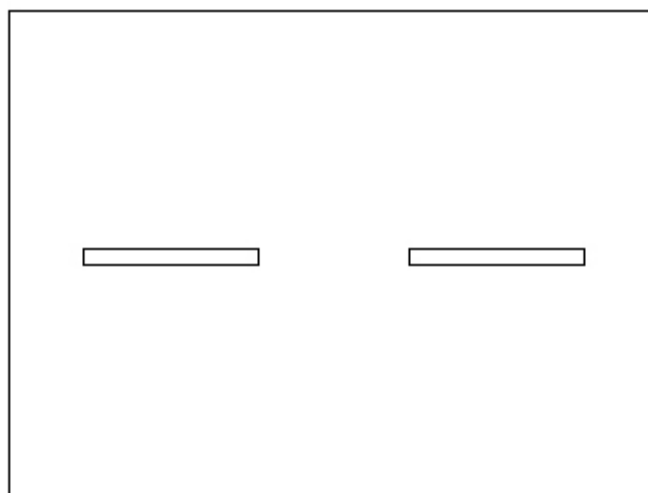


Figura 131 - Distribuição das luminárias 3450 2xT16 54W
Fonte: SOFTLUX 2.2.

Conforme a Figura 132 e a Figura 133, tem-se como resultado:

E médio: 494 lux;

E máximo: 774 lux;

E mínimo: 99 lux;

E mcz: 467 lux.

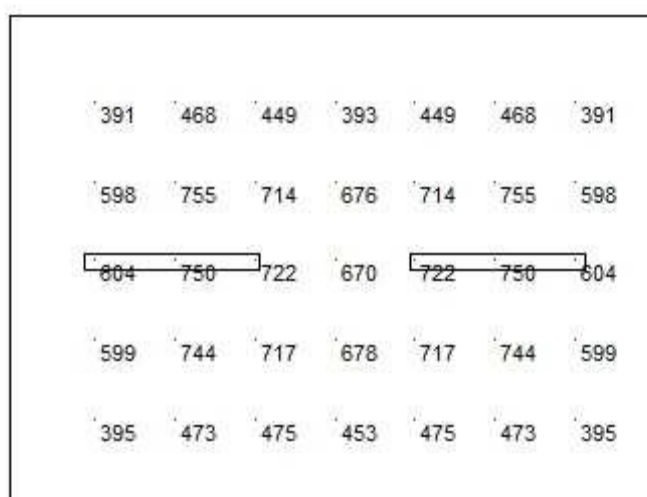


Figura 132 - Método ponto a ponto: segundo caso
Fonte: SOFTLUX 2.2.

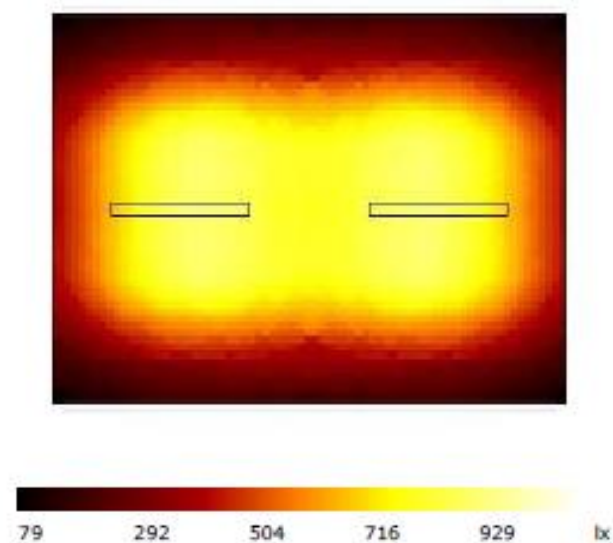


Figura 133 - Iluminância: segundo caso

Fonte: SOFTLUX 2.2.

7.4.2.3 Luminária 34162xT1614W

A luminária 34162xT1614W é assimétrica de embutir em forro de gesso ou modulado com perfil "T" de aba 25mm. Apresenta corpo e aletas planas em chapa de aço tratada com acabamento em pintura eletrostática na cor branca e refletor em alumínio anodizado de alto brilho (reflexão total de 86%). Equipada com porta-lâmpada antivibratório em policarbonato, com trava de segurança e proteção contra aquecimento nos contatos, conforme a Figura 134.

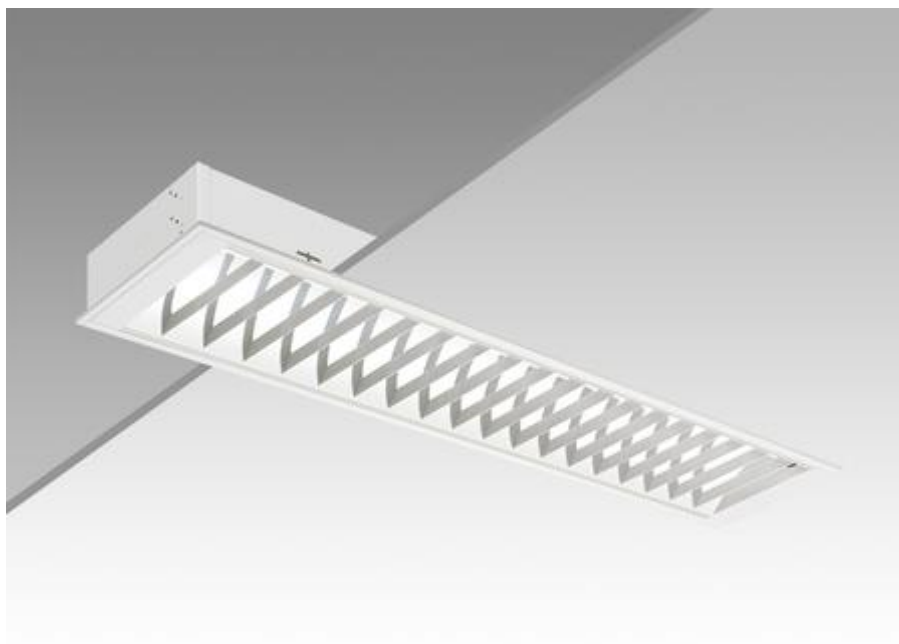


Figura 134 - Luminária 3416 2xT16 14W

Fonte: ITAIM (2013).

luminária: 3416 2xT16 14W;

código: 3416.214.500;

iluminância solicitada: 500 lux;

quantidade: 8, conforme a Figura 135;

número de colunas: 4;

número de linhas: 2;

distância entre colunas: 1,14 m;

distância entre linhas: 1,74 m;

distância parede-colunas: 0,57 m;

distância parede-linhas: 0,87 m;

fluxo luminoso: 1200 lm.

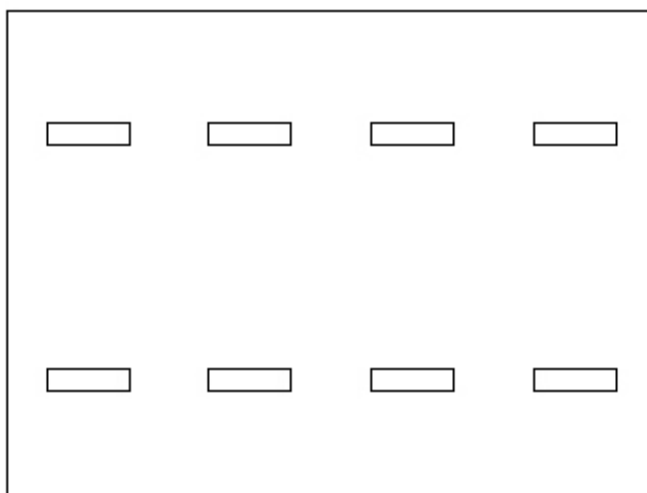


Figura 135 - Distribuição das luminárias 3416 2xT16 14W
Fonte: SOFTLUX 2.2.

Conforme a Figura 136 e a Figura 137, tem-se como resultado:

E médio: 395 lux;

E máximo: 570 lux;

E mínimo: 176 lux;

E mcz: 494 lux.

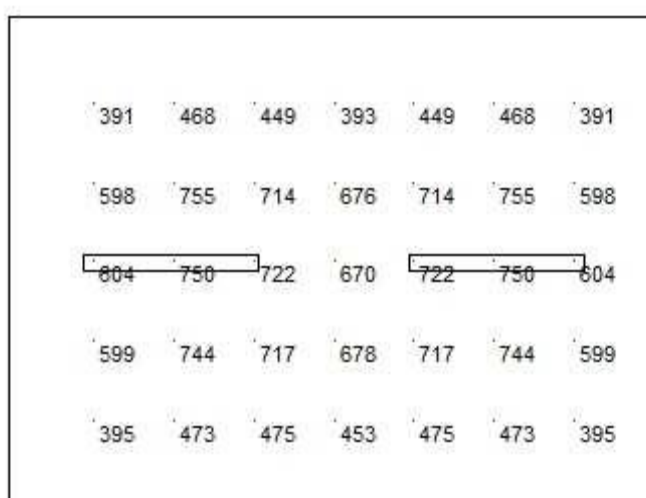


Figura 136 - Método ponto a ponto: terceiro caso
Fonte: SOFTLUX 2.2.

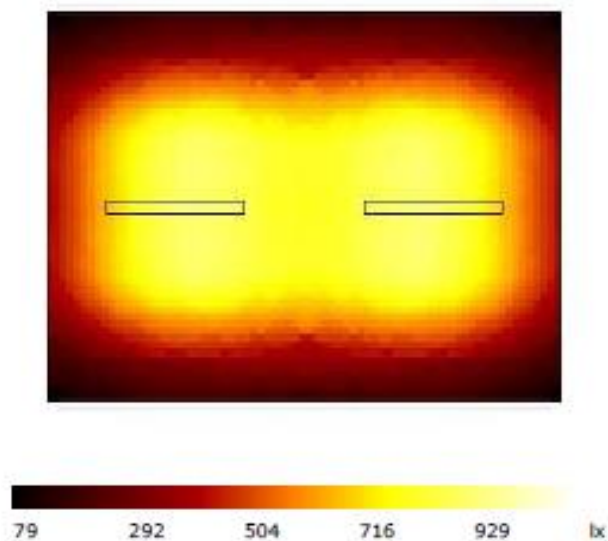


Figura 137 - Iluminância: terceiro caso

Fonte: SOFTLUX 2.2.

7.4.2.4 Luminária Itaberaba 2xTC-D 18W

A luminária Itaberaba 2xTC-D 18W é quadrada de embutir, para 2 lâmpadas fluorescentes compactas de 18W, dupla, 2 pinos. Apresenta corpo em chapa de alumínio tratada com acabamento em pintura eletrostática epóxi-pó na cor branca e refletor em alumínio anodizado jateado. Difusor recuado em vidro plano temperado transparente. Necessita de reator eletromagnético, conforme a Figura 138.



Figura 138 - Luminária Itaberaba 2xTC-D 18W

Fonte: ITAIM (2013).

luminária: Itaberaba 2xTC-D 18W;

código: 8273.2C2.110;

iluminância solicitada: 500 lux;

quantidade: 12, conforme a Figura 139;

número de colunas: 4;

número de linhas: 3;

distância entre colunas: 1,14 m;

distância entre linhas: 1,16 m;

distância parede-colunas: 0,57 m;

distância parede-linhas: 0,58 m;

fluxo luminoso: 1200 lm.

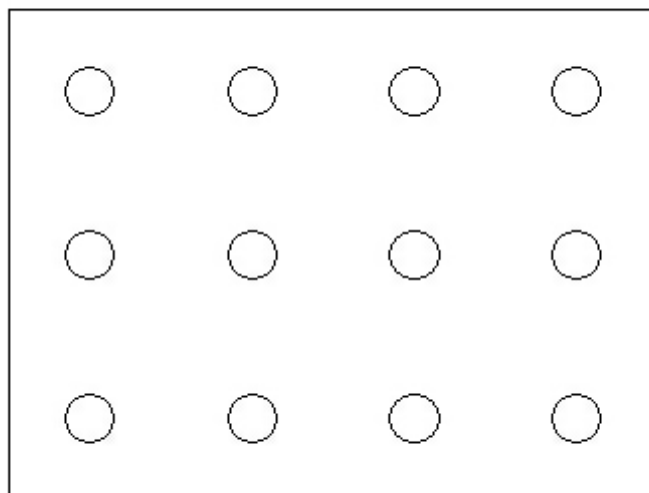


Figura 139 - Distribuição das luminárias Itaberaba 2xTC-D 18W

Fonte: SOFTLUX 2.2.

Conforme a Figura 140 e a Figura 141, tem-se como resultado:

E médio: 411 lux;

E máximo: 565 lux;

E mínimo: 186 lux;

E mcz: 494 lux.

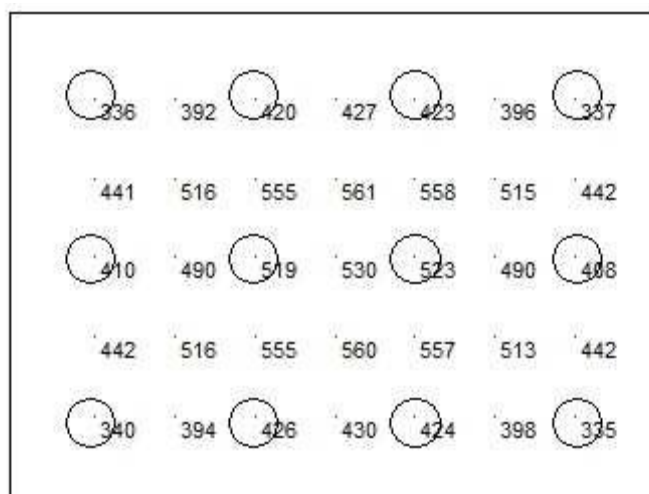


Figura 140 - Método ponto a ponto: quarto caso

Fonte: SOFTLUX 2.2.

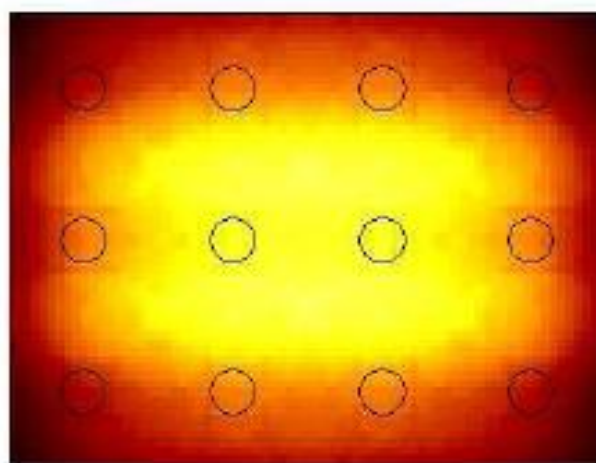


Figura 141 - Iluminância: quarto caso

Fonte: SOFTLUX 2.2.

7.4.2.5 Luminária Opala 2xTC-D 26W

A luminária Opala 2xTC-D 26W é circular de embutir, para 2 lâmpadas fluorescentes compactas de 26W, duplas, 2 pinos. Apresenta corpo em alumínio repuxado com acabamento em pintura eletrostática epóxi-pó na cor branca e refletor em alumínio anodizado com difusor recuado em vidro plano temperado transparente. Necessita de reator eletromagnético, conforme a Figura 142.



Figura 142 - Luminária Opala 2xTC-D 26W

Fonte: ITAIM (2013).

luminária: Opala 2xTC-D 26W;

código: 8017.2C3.110;

iluminância solicitada: 500 lux;

quantidade: 6, conforme a Figura 143;

número de colunas: 3;

número de linhas: 2;

distância entre colunas: 1,52 m;

distância entre linhas: 1,74 m;

distância parede-colunas: 0,76 m;

distância parede-linhas: 0,87 m;

fluxo luminoso: 1800 lm.

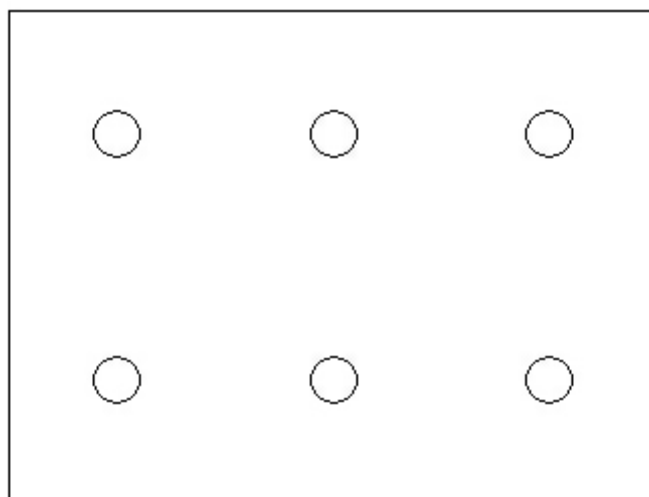


Figura 143 - Distribuição das luminárias Opala 2xTC-D 26W

Fonte: SOFTLUX 2.2.

Conforme a Figura 144 e a Figura 145, tem-se como resultado:

E médio: 368 lux;

E máximo: 522 lux;

E mínimo: 152 lux;

E mcz: 414 lux.

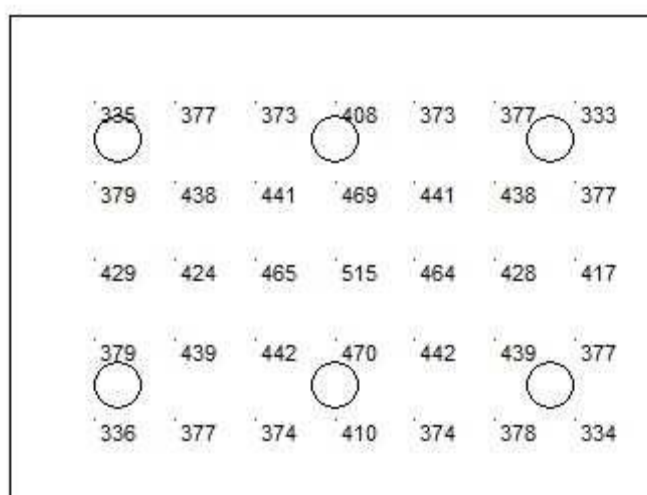


Figura 144 - Método ponto a ponto: quinto caso

Fonte: SOFTLUX 2.2.

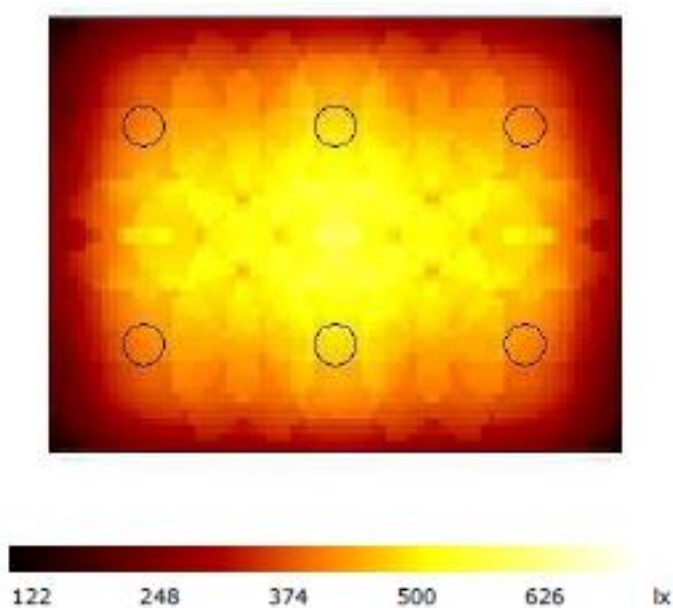


Figura 145 - Iluminância: quinto caso

Fonte: SOFTLUX 2.2.

7.4.3 Estudos comparativos

A Tabela 34 mostra o estudo comparativo das diferentes luminárias ensaiadas na simulação. Por meio dela é perceptível a diferença e a eficiência de uma luminária que utiliza LED ao invés de lâmpadas fluorescentes. A luminária EF35-E24LED4K consegue fornecer uma intensidade média de 676 lux, dividindo

pela potência elétrica das 9 luminárias que equivalem a 216 W, obtém-se uma média de 3,129 lux por Watt. Já luminárias que utilizam lâmpadas fluorescentes tubulares são capazes de fornecer no máximo 2,37 lux por Watt, utilizando a luminária 2007 2xT16 28W que necessita de duas lâmpadas de 28 W. Essa diferença é ainda mais perceptível quando foi simulado a utilização de lâmpadas fluorescentes compactas, a eficiência lux/W chegou ao máximo de 1,44, utilizando a luminária Lazulita 2xTC-D 26W, que requer para seu funcionamento duas lâmpadas de 26 W.

Cabe observar que a potência elétrica de 24 W referente à luminária EF35-E24LED4K é obtida desconsiderando o driver de 2 W, que, incluso, totalizaria a potência de 26 W, apresentada na Tabela 28.

A Figura 146 apresenta um gráfico comparativo entre as eficiências calculadas para cada luminária.

Tabela 34 – Comparação de resultados luminotécnicos.

| Luminária | Potência Elétrica por luminária (W) | Qtd | Potência Elétrica Total (W) | Emcz (lux) | Eméd (lux) | Emáx (lux) | Emín (lux) | Eficiência (lux/W) |
|----------------------------------|-------------------------------------|-----|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|--------------------|
| EF35-E24LED4K (modelo utilizado) | 24 | 9 | 216 | 702 | 676 | 840 | 360 | 3,12963 |
| 2007 2xT16 28W | 56 | 4 | 224 | 609 | 531 | 718 | 238 | 2,37053 |
| 3450 2xT16 54W | 108 | 2 | 216 | 467 | 494 | 774 | 99 | 2,28703 |
| 3416 2xT16 14W | 28 | 8 | 224 | 494 | 395 | 570 | 176 | 1,76339 |
| lpenum1xQR111 50W | 50 | 24 | 1200 | 531 | 516 | 764 | 217 | 0,43 |
| Itaberaba 2xTC-D 18W | 36 | 12 | 432 | 494 | 411 | 565 | 186 | 0,95138 |
| Itaberaba 2xTC-D 26W | 52 | 8 | 416 | 494 | 422 | 587 | 182 | 1,01442 |
| Lazulita 2xTC-D 26W | 52 | 6 | 312 | 534 | 450 | 632 | 213 | 1,44230 |
| Opala 2xTC-D 26W | 52 | 6 | 312 | 414 | 368 | 522 | 152 | 1,17948 |
| Rubi 2xTC-D 18W | 52 | 8 | 416 | 504 | 450 | 685 | 202 | 1,08173 |

Fonte: Os autores

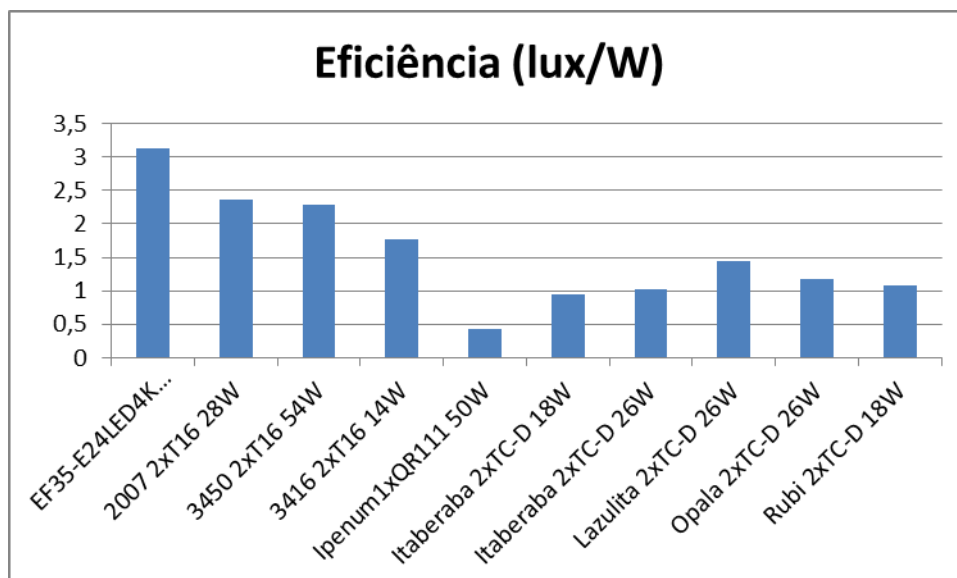


Figura 146 - Comparação da eficiência (lux/W)

Fonte: Os autores.

A partir destes resultados, verifica-se que mesmo comparando-se a eficiência da luminária LED com a da luminária fluorescente 2007 2xT16 28W, que apresentou a maior eficiência luminosa em relação as demais luminárias fluorescentes, é obtido um aumento de 32% na eficiência luminosa da luminária LED utilizada na sala da coordenação.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um projeto como o Escritório Verde, reconhecido internacionalmente como modelo em sustentabilidade, é a primeira edificação do Paraná com um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede, além de ser uma verdadeira vitrine para tecnologias diferentes das usuais. Apresenta para a população em geral, principalmente engenheiros e técnicos da área, o que existe em termos de práticas sustentáveis, como a geração distribuída, os materiais empregados, o modelo de construção utilizado, o ganho em eficiência energética, entre outros.

Este trabalho teve como escopo apresentar tecnologias e práticas atreladas a uma maior sustentabilidade. A importância do desenvolvimento sustentável, a situação brasileira neste aspecto, observando-se o que já foi feito, o que está sendo implantado e as inúmeras possibilidades de projetos futuros, é uma das contribuições deste trabalho.

A partir da fundamentação teórica levantada, partiu-se para a etapa de medições e verificações, para estudar a eficiência energética dos sistemas de energia existentes no Escritório. Para o Sistema Fotovoltaico Isolado, pode-se concluir que há um suprimento de energia superior ao necessário para alimentar a moto bomba, que está ligada no barramento em 12 V. Essa moto bomba pode encher a caixa d'água até 8 vezes em um dia, conforme o item 6.4.1. Para a caixa d'água esvaziar totalmente, considerando que está inicialmente completa, ou seja, com seu volume de 500 litros, seriam necessários 78 acionamentos das descargas dos vasos sanitários no fluxo máximo, ou ainda, 157 acionamentos das descargas no fluxo mínimo, e uma irrigação do jardim de parede durante 5 minutos, o que é, naturalmente, bem acima do padrão de uso do EV.

O Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede foi estudado com base nas medições registradas pelos medidores que estão apresentados em 6.5.1. Os valores registrados no medidor 3, que apresenta a diferença entre a energia consumida e a energia gerada no Escritório, conforme dito em 6.5.1, apresentaram desvios em relação aos valores calculados, provavelmente devido a algum problema de instalação. No entanto, a geração fotovoltaica mensal, considerando o período mostrado no item 6.5.2 (28/12 até 28/01) foi de 217,79 kWh. Este valor está acima

do consumo médio mensal no setor residencial brasileiro, que foi igual a 154 kWh/mês em 2010 (MENDONÇA, 2011), o que mostra que sistemas fotovoltaicos gerando energia juntamente com a rede elétrica podem ser muito viáveis.

Com a implantação de um software para supervisionar os três medidores, além do acesso a memória de massa dos medidores, novas pesquisas e conclusões poderão ser feitas.

O estudo do sistema de iluminação a base de LEDs foi feito com base nas medições efetuadas no Escritório e nas simulações, que constam nos itens 7.3 e 7.4, respectivamente. Foi possível comparar a tecnologia LED e a tecnologia fluorescente, a partir de diferentes modelos de luminárias, e o LED mostrou uma eficiência energética superior, ou seja, produziu uma iluminância maior para uma unidade de potência.

REFERÊNCIAS

ABREU, Y.; OLIVEIRA, M. A.; GUERRA, S. **Energia, economia, rotas tecnológicas**. Universidade de Malaga. 2010.

ACKERMANN, T., ANDERSSON, G., SÖDER, L., **Distributed generation: a definition**. Suécia. 2001. 204 p.

ANEEL. **Resolução normativa nº482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 1 agosto 2012a.

ANEEL. **Energia eólica**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf)>. Acesso em: 2 agosto 2012b.

ANDERSON, M.. **Wind turbines, industry and trade summary**. Washington, DC, 2009. Disponível em: <<http://www.usitc.gov/publications/332/ITS-2.pdf>>. Acesso em: 5 setembro 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10899: Conversão fotovoltaica de energia solar**. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 11876: Módulos fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5413: Iluminância de interiores**. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5382: Verificação de iluminância de interiores**. Rio de Janeiro, 1985.

BELINKY, Aron; TELLES, Pedro; BORN, Rubens. **RIO+20: as informações essenciais**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/proclima/file/rio_20/docs/Rio+20-As%20informa%C3%A7%C3%B5es%20essenciais.pdf>. Acesso em: 6 julho 2012.

BLUE SOL. **Brasil e Alemanha fecham parceria de energia.** Disponível em: <<http://www.blue-sol.com/blog/brasil-e-alemanha-fecham-parceria-de-energia>>. Acesso em: 12 mar. 2012a.

BLUE SOL. **Projeto de lei incentiva energia solar.** Disponível em: <<http://www.blue-sol.com/blog/projeto-de-lei-incentiva-energia-solar>>. Acesso em: 14 mar. 2012b.

BLUE SOL. **Treinamento em energia solar fotovoltaica.** 2011. 1 CD-ROM.

BO, Wang; KA, Lan. **Analysis of the distributed generation system and the influence on power loss.** IEEEEXPLORE: 2011.

BRITISH WIND ENERGY ASSOCIATION. **Wind electricity generation.** Londres, 2012.

CASTRO, R. M. G. **Uma introdução às energias renováveis.** Press. 2011.

CAMPOS, Cícero. **Aquecimento de água por energia solar.** 2011. Disponível em: <<http://www.ifi.unicamp.br>>. Acesso em: 10 jun. 2012.

CHRISTOFOLI, Bruno A.. **Superação das barreiras ambientais à expansão das energias alternativas limpas.** São Paulo: Jornal da energia, 2011. Disponível em: <http://www.jornaldaenergia.com.br/artigo_ler.php?id_artigo=47>. Acesso em: 25 set. 2011.

CNI Confederação Nacional da Indústria. **Matriz energética: cenários, oportunidades e desafios.** Brasília, 2007. Disponível em: <<http://www.cni.org.br/portal/data/files/8A9015D015A0F71F0115AE4B9A37466D/Matriz%20Energ%C3%A9tica.pdf>>. Acesso em: 26 set.2011.

COMISSÃO EUROPÉIA. **A história da lâmpada incandescente.** 2012a. Disponível em: <http://ec.europa.eu/energy/lumen/overview/avariedchoice/alhistory/index_pt.htm> Acesso em: 22 mai 2012.

COMISSÃO EUROPEIA. **Novas lâmpadas e embalagens**. 2012b. Disponível em: <http://ec.europa.eu/energy/lumen/overview/whatchanges/index_pt.htm> Acesso em: 22 mai 2012.

CPFL ENERGIA. Caminhos da energia. Brasília: CANAL FUTURA, 2011. 10 episódios.

CREDER, Hélio. **Instalações elétricas**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1983. 318 p.

CREDER, Hélio. **Instalações elétricas**. 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CRESESB. Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES). CEPEL - CRESESB. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2004, 206 p.

DANG, Ke; YU, Jiqing; DANG, Tong; HAN, Bo. **Benefit of distributed generation on line loss reduction**. IEEEEXPLORE: 2011.

DOGDE, D. M.. **Illustrated history of Wind Power development**. Disponível em: <<http://www.telosnet.com/wind>>. Acesso em: 4 set 2012.

DUTRA, R. M. **Energia eólica, princípios e tecnologias**. Ministério de Minas e Energia. 2009. 58 p.

DUTRA, R.M.. **Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro**. Dissertação de M. Sc., Programa de Planejamento Energético, COPPE/UF RJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2001. 300 p.

DUTRA, R. M.. **Propostas de políticas específicas para energia eólica no Brasil após a primeira fase do Proinfa**. 2007. 436 f. Tese (Pós-graduação em engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2007.

ELETROBRAS; PROCEL. **Relatório de resultados do Procel 2012 – ano base 2011**. Rio de Janeiro, 2012.

EPE. **Balço energético nacional 2012: resultados preliminares (ano base 2011)**. Disponível em:

<https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 5 julho 2012.

ESCRITÓRIO VERDE. Disponível em: <<http://www.escritorioverdeonline.com.br>>. Acesso em: 25 set. 2011.

FITZGERALD, A. E.; KUSKO, A.; KINGSLEY, A.. **Máquinas elétricas**. McGraw-Hill do Brasil. 1975. 618 p.

FREITAS, Luciana. De tendência à realidade. **Revista Lumière**, n. 160, agosto 2011, 38 p.

GALVÃO, L.C.; NUNES, L. F.. **Notas de aula: Cálculo numérico**. Disponível em: <http://pessoal.utfpr.edu.br/laurogalvao/aulas/calculo_numerico/index.html>. Acesso em: 21 jan. 2012.

GAZETA DO POVO. **Onu premia Escritório Verde da UTFPR**. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/vidaecidadania/conteudo.phtml?id=1302589&tit=ONU-premia-Escritorio-Verde-da-UTFPR>>. Acesso em: 20 jul 2012.

GE ILUMINAÇÃO. **A história da luz**. Disponível em: <<http://www.gelampadas.com.br/about/historia.asp>>. Acesso em: 9 mai 2012.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global statistics 2012**. Disponível em: <<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>>. Acesso em: 23 fev 2012.

GOEKING, Weruska. Lâmpadas e LEDs. **Revista O Setor Elétrico**, n. 46, Nov 2009. Disponível em: <<http://www.osetoelettrico.com.br/web/component/content/article/58-artigos-e-materias-relacionadas/176-lampadas-e-LEDs.html>>. Acesso em: 9 mai 2012.

GREENPRO. **Energia fotovoltaica – manual sobre tecnologias, projecto e instalação**. Disponível em: <<http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>>. Acesso em: 13 julho 2012.

GRUPO SETORIAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ABINEE. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. 2012.

Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>. Acesso em: 10 abril 2013.

HEIER, S. **Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems**. John Wiley & Sons Inc. 2ª Edição, 2006.

IBGE. **Indicadores de desenvolvimento sustentável: Brasil 2012**. Disponível em: <www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/default_2012.shtm>. Acesso em: 6 julho 2012.

IEEE SCC21. (IEEE Standards Coordinating Committee 21). **1547/D08 - Draft Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electrical Power System**. IEEEEXPLORE: 2011. Disponível em: <<http://igs.nigc.ir/igs/IEEE/P1547-D08.PDF>>. Acesso em: 20 julho 2012.

INEE: Instituto Nacional de Eficiência Energética. **Sobre GD e Cogeração**. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_sobre_gd_cg.asp?Cat=forum>. Acesso em: 26 set.2011.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **LEDs orgânicos superam eficiência das lâmpadas fluorescentes**. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=LEDs-organicos-superam-eficiencia-das-lampadas-fluorescentes&id=010115090526>>. Acesso em: 26 set.2011.

ITAIM ILUMINAÇÃO. **Informações técnicas**. Disponível em: <<http://www.itaimiluminacao.com.br/catalogo>>. Acesso em: 07 fev. 2013.

JOHNSON, G. L. **Windbook**. Manhattan. 2006. 449 p.

JOSSEN, A., GARCHE, J., Sauer, D., 2004. **Operation conditions of batteries in PV applications**. Solar Energy, 76(6), p 759-769. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/96104725/Jossen-Garche-Sauer-2004-Operation-Conditions-of-Batteries-in-PV-Applications>>. Acesso em: 9 julho 2012.

LASSETER, R. H.. **Microgrids and distributed generation**. IEEEEXPLORE: 2001. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1354758&url=http%3A%2F%>>

2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1354758>. Acesso em: 15 julho 2012.

LAYTON, J. **Turbinas eólicas matam pássaros?**. 2011. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/helices-eolicas-matam-passaros.htm>>. Acesso em: 3 set 2012.

LIGHT EMITTING DIODES. **History of LEDs**. Disponível em: <<http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap01/chap01.htm>>. Acesso em: 27 jun 2012.

LINDEN, A.. **Batteries hand book**. Wiley and Sons, Philadelphia, EUA. 1995. Disponível em: <<http://pparseh.com/album/DOWNLOAD/0071359788%20-%20Handbook%20of%20Batteries.pdf>>. Acesso em: 10 julho 2012.

LOUÇA, Francisco. **Entrevista**. Portal das Energias Renováveis, 2009. Disponível em: <http://www.energiasrenovaveis.com/DetailheNoticias.asp?ID_conteudo=177&ID_area=15>. Acesso em: 12 mar. 2012.

LUMICENTER. **Informações técnicas**. Disponível em: <http://www.lumicenteriluminacao.com.br/arquivos/info_tecnicas_lumicenter.pdf>. Acesso em: 23 julho 2012.

LUMIDEC. **Led Solution**. Disponível em: <<http://www.lumicenteriluminacao.com.br/lumidec.php/pt/catalogo/classe/ledsolution.html>> Acesso em: 21 fev 2013.

MARQUES, F. C. P. et al.. **Energia eólica**. Disponível em: <<http://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/aerogerador-de-eixo-horizontal>>. Acesso em: 14 ago 2012.

MENDONÇA, Luciana. **Consumo de energia deve crescer 4,8% até 2020**. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/component/content/article/57-artigos-e-materias/532-consumo-de-energia-deve-crescer-48-ate-2020.html>>. Acesso em: 04 fevereiro 2013.

MERKASOL. **Turbinas eólicas eixo vertical 4kW UGE-4K**. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 5 julho 2012.

MME. **Plano nacional de eficiência energética: premissas e diretrizes básicas**. Disponível em: <<http://www.merkasol.com/turbinas-eolicas-eixo-vertical-4Kw-UGE-4K>>. Acesso em: 13 set 2012.

MUNTEANU, I.; BRATCU, A. I.. **Wind energy conversion systems**. 2008. 283 p.

MOREIRA, Vinícius A.. **Iluminação elétrica**. São Paulo, SP: E. Blücher, c1999. ix, 189 p.

NOVICKI, Jackson M.; MARTINEZ, Rodrigo. **LEDs para iluminação pública**. 2008. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação), Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2008.

OLIVEIRA, Hallyson E. **Tecnologia fotovoltaica em filmes finos (películas delgadas)**. Minas Gerais, 2008.

ONS. **Acompanhamento mensal da geração de energia das usinas eolielétricas com programação e despacho centralizados pelo Ons**. 2011.

ONUBR. **Presidente da Assembleia Geral da ONU pede implementação do documento final da Rio+20**. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/presidente-da-assembleia-geral-da-onu-pede-implementacao-do-documento-final-da-rio20/>>. Acesso em: 13 jul 2012.

OSRAM. **Quantitatives**. Disponível em: <http://www.osram.pt/osram_pt/Design_de_Iluminacao/Sobre_Iluminacao/Light_%26_Space/Technical_basics_of_light_/Quantitatives/index.html>. Acesso em: 23 mai 2012.

PHILIPS. **Guia de compras**. 2011. Disponível em: <http://www.lighting.philips.com.br/pwc_li/br_pt/lightcommunity/assets/Guia_de_Compras_A4_seq.pdf>. Acesso em: 6 jun 2012.

PINHO, J. T.; ZILLES, R. **Energia solar fotovoltaica**. UFSC, 2011. Disponível em: <<http://www.fotovoltaica.ufsc.br/downloads>>. Acesso em: 4 jul 2012.

PLATAFORMA ITAIPU. **Geração distribuída: solução para a eficiência energética.** Disponível em: <<http://www.plataformaitaipu.org/plataforma/geracao-distribuida>>. Acesso em: 02 maio 2012.

PROGRAMA LUZ PARA TODOS. Disponível em: <http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/Asp/o_programa.asp>. Acesso em: 12 dez 2012.

RECHSTEINER, Rudolf. **Wind power in context – A clean revolution in the energy sector.** Basel. 2008

REIS, Lineu B.; SILVEIRA, Semilda. **Energia elétrica para o desenvolvimento sustentável.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

REVISTA LUMIERE. A magia da luz eletrônica. Entenda como funcionam os LEDs. 2007. **Revista Lumière**, n. 109, ano 9, p. 43.

REZENDE, S. M. (2004). **Materiais e dispositivos eletrônicos.** 2 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física.

RIO20. **Governos: alguns compromissos assumidos durante a RIO+20.** Disponível em: <http://www.rio20.gov.br/sala_de_imprensa/noticias-nacionais1/governos-alguns-compromissos-assumidos-durante-a-rio-20>. Acesso em: 3 jul 2012.

ROCHA, F. F.. **Avaliação e projeto de uma fonte de energia para sistemas de detecção de falta em redes de distribuição rurais.** Dissertação de mestrado, UFMG, jul 2005.

RODRIGUES, Cláudio R. B. S. **Reator eletrônico ressonante orientado ao teste dimerizado de lâmpadas de vapor de mercúrio e vapor de sódio em alta pressão.** 2009. Dissertação (Mestrado), Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/ppee/files/2010/06/Disserta%C3%A7%C3%A3o-CI%C3%A1udio.pdf>>. Acesso em: 6 jun 2012.

ROIZENBLATT, Isac. **Crêterios da ilumina o elétrica urbana**. 2009. Tese (P s-Gradua o), Arquitetura e Urbanismo, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/Ilumina%E7%E3o%20P%FAblica/Pesquisa/Crit%E9rios%20da%20Ilumina%E7%E3o%20EI%E9trica%20Urbana/Isac%20Roizenblatt1.pdf>>. Acesso em: 12 jun 2012.

RUGOWSKY, R A.. **Wind turbines**. Office of Industries Publication. 2009. 74 p.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da gera o solar fotovoltaica integrada a edifica es urbanas e interligada   rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: UFSC, 2004.

RÜTHER, R; PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. D. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: 2006.

SABER ELETRONICA. **LED Driver Universal**. 2008. Disponível em: <<http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/903>>. Acesso em: 25 mai 2012.

SALEH, Bahaa E.A.; TEICH, Malvin C.. **Fundamentals of photonics**. 2nd ed. New York: John Wiley, c2007. xix, 1177 p. (Wiley Series in pure and applied optics)

SANTOS, Afonso H. M. **Conserva o de energia: eficiência energética de instala es e equipamentos**. Itajubá: Editora EFEI, 2001.

SCANDAR NETO, W. J. **Síntese que organiza o olhar: uma proposta para constru o e representa o de indicadores de desenvolvimento sustentável e sua aplica o para os municípios fluminenses**. Disserta o de Mestrado, ENCE - Escola Nacional de Ciências Estatísticas, Rio de Janeiro: junho 2006, 106 p.

SOFTLUX 2.2. Disponível em: <<http://www.itaimiluminacao.com.br/servicos/downloads>>. Acesso em: 15 mai 2012.

SOLELUX. **Tecnologia LED**. Disponível em: <<http://www.solelux.com.br/tecnologia-LED/>>. Acesso em: 15 mai 2012.

SOVERINDO, M. H.. **Impacto dos aerogeradores sobre a avifauna e quiropterofauna no Brasil**. 2009. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 9 de dezembro de 2009.

TECMUNDO. **LED: a iluminação do futuro já disponível no presente**. Disponível em: <<http://www.tecmundo.com.br/qd-LED/2654-LED-a-iluminacao-do-futuro-ja-disponivel-no-presente.htm>>. Acesso em: 25 jun 2012

UFRGS. **“Programa RADIASOL”**. Laboratório de Energia Solar, 2012.

UFSC. **Cor**. Disponível em: <http://www.arq.ufsc.br/arq5661/trabalhos_2003-2/iluminacao_artificial/cor.htm#cor6>. Acesso em: 22 maio 2012.

UNICAMP. **LED: o que é, e como funciona**. Laboratório de Iluminação – UNICAMP. Disponível em: <<http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/dicasemail/LED/dica36.htm>>. Acesso em: 5 jun 2012.

UNIPOWER. **Manual técnico: bateria chumbo - ácida selada regulada por Válvula**. Disponível em: <<http://www.robocore.net/upload/ManualTecnicoBateriaUnipower.pdf>>. Acesso em: 02 agosto 2012.

UNIVERSIDADE DE COIMBRA. **BCSD Portugal: Conselho empresarial para o desenvolvimento sustentável. Manual de boas práticas de eficiência energética**. Portugal, 2005. 51 p.

URBANETZ JUNIOR, J. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e dimensionamento de sistemas. Anexo 1: Método prático para dimensionamento de sistemas FV isolados**. Curitiba, 2012.

UTFPR. **Escritório Verde sustentável é construído no Campus Curitiba**. Disponível em: <<http://www.utfpr.edu.br/estrutura-universitaria/diretorias-de-gestao/dircom/noticias/noticias/escritorio-verde-sustentavel-e-construido-no-campus-curitiba>>. Acesso em: 25 set. 2011.

VERA, L. H. **Análise do impacto do comportamento de baterias em sistemas fotovoltaicos autônomos**. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/17496>>. Acesso em: 6 julho 2012.







WISH, Valdis. **Sequestro de carbono: como limpar o carvão**. Allianz, 2009. Disponível em: <http://sustentabilidade.allianz.com.br/energia/combustiveis_fosseis/?443/Sequestro-de-carbono-como-limpar-o-carvao>. Acesso em: 12 mar. 2012.

ZAMOSTNY, D. **Solar history: Alexandre Edmond Becquerel**. Disponível em: <<http://www.solareworld.com/blog/green-community/solar-history-alexandre-edmond-becquerel>>. Acesso em: 4 julho 2012.





ANEXO A - TABELA DE SUBSTITUIÇÃO

TABELA DE SUBSTITUIÇÃO

Confira no comparativo como as novas lâmpadas LEDs Philips podem substituir as incandescentes, halógenas e fluorescentes convencionais proporcionando até 80% de economia de energia, qualidade de luz, emitindo menos calor; com vida útil muito mais longa e menores custos de manutenção.
















| Lâmpadas Incandescentes | X | Lâmpadas VisionLED |
|---|---|--|
|  <p>Standard Incandescente 25W Potência: 25W Vida útil: 1.000h Tensão: 127V ou 220V Temperatura de cor: 2.700K</p> <p>25W</p> | <p>ECONOMIA de até 80% DE ENERGIA</p> <p>DURA 25 VEZES MAIS</p> |  <p>VisionLED A55 4W e 5W Potência: 4W e 5W Vida útil: 25.000h Tensão: 100-240V (multitensão) Temperatura de cor: luz suave 2.700K (5W) ou luz clara 6.500K (4W)</p> <p>4W e 5W</p> |
|  <p>Standard Incandescente 35W Potência: 35W Vida útil: 1.000h Tensão: 127V ou 220V Temperatura de cor: 2.700K</p> <p>35W</p> | <p>ECONOMIA de até 80% DE ENERGIA</p> <p>DURA 25 VEZES MAIS</p> |  <p>VisionLED A60 5W e 7W Potência: 5W e 7W Vida útil: 25.000h Tensão: 100-240V (multitensão) Temperatura de cor: luz suave 2.700K (7W) ou luz clara 6.500K (5W)</p> <p>5W e 7W</p> |
|  <p>Standard Incandescente 50W Potência: 50W Vida útil: 1.000h Tensão: 127V ou 220V Temperatura de cor: 2.700K</p> <p>50W</p> | <p>ECONOMIA de até 80% DE ENERGIA</p> <p>DURA 25 VEZES MAIS</p> |  <p>VisionLED A60 9W Potência: 9W Vida útil: 25.000h Tensão: 100-240V (multitensão) Temperatura de cor: luz clara 6.500K</p> <p>9W</p> |

Observações: • Equivalência especificada na tensão 220V.
• Pela frequência da renovação desta tecnologia os produtos podem sofrer alterações em suas especificações.

| Lâmpadas Halógenas | X | Lâmpadas AmbientLED |
|--|---|--|
|  <p>Halógena Mini Dicroica 35W Potência: 35W Vida útil: 2.000h Tensão: 12V Temperatura de cor: 2.800K Abertura de fecho: 36°</p> <p>35W</p> | <p>ECONOMIA de até 80% DE ENERGIA</p> <p>DURA 12 VEZES MAIS</p> |  <p>AmbientLED MR16 7W Potência: 7W Vida útil: 25.000h Tensão: 12V Temperatura de cor: luz suave 2.700K Abertura de fecho: 36° Dimerizável <i>Compatível com qualquer transformador do mercado</i></p> <p>7W</p> |
|  <p>Halógena Mini Dicroica 50W Potência: 50W Vida útil: 2.000h Tensão: 12V Temperatura de cor: 3.200K Abertura de fecho: 36° Dimerizável com transformador apropriado</p> <p>50W</p> | <p>ECONOMIA de até 80% DE ENERGIA</p> <p>DURA 12 VEZES MAIS</p> |  <p>AmbientLED MR16 10W Potência: 10W Vida útil: 25.000h Tensão: 12V Temperatura de cor: luz suave 2.700K Abertura de fecho: 36° Dimerizável <i>Compatível com qualquer transformador do mercado</i></p> <p>10W</p> |

Observação: Pela frequência da renovação desta tecnologia os produtos podem sofrer alterações em suas especificações.




Lâmpadas Incandescentes e Halógenas X

| | | | | |
|---|--|---|--|---|
|  | Standard Incandescente Potência: 60W Vida útil: 1.000h Tensão: 127V e 220V Temperatura de cor: 2.700K Dimerizável |  |  | MASTER LED A19 Potência: 12W Vida útil: 25.000h Tensão: 110-130V e 220-240V Temperatura de cor: luz suave 2.700K Dimerizável |
|  | Halógena TwistLine Potência: 50W Vida útil: 2.000h Tensão: 127V Temperatura de cor: 2.800K Abertura de fecho: 20° Dimerizável |  |  | MASTER LED GU10 Potência: 7W Vida útil: 40.000h Tensão: 220-240V ou 100-240V (multitensão) Temperatura de cor: luz suave 2.700K Abertura de fecho: 25° (220-240V) 25° ou 40° (multitensão) Dimerizável (220-240V) |
|  | Halógena PAR20 Potência: 50W Vida útil: 2.500h Tensão: 127V ou 220V Temperatura de cor: 2.700K Abertura de fecho: 25° Dimerizável |  |  | MASTER LED PAR20 Potência: 7W Vida útil: 45.000h Tensão: 110-130V ou 220-240V Temperatura de cor: luz suave 2.700K Abertura de fecho: 25° Dimerizável |
|  | Halógena PAR30S Potência: 75W Vida útil: 2.500h Tensão: 130V ou 220V Temperatura de cor: 2.900K Abertura de fecho: 30° Dimerizável |  |  | MASTER LED PAR30S Potência: 12W Vida útil: 45.000h Tensão: 110-130V ou 220-240V Temperatura de cor: luz suave 2.700K Abertura de fecho: 25° Dimerizável |
|  | Halógena PAR38 Potência: 75W (110V) 100W (220V) Vida útil: 2.500h Tensão: 130V ou 220V Temperatura de cor: 2.900K Abertura de fecho: 30° Dimerizável |  |  | MASTER LED PAR38 Potência: 17W 18W Vida útil: 45.000h Tensão: 110-130V (17W) e 220-240V (18W) Temperatura de cor: luz suave 2.700K Abertura de fecho: 25° Dimerizável |

Observações: • Equivalência especificada na tensão 220V.

• Pela frequência da renovação desta tecnologia os produtos podem sofrer alterações em suas especificações.

Lâmpadas Fluorescentes Convencionais X

| | | | | |
|---|---|---|--|---|
|  | TLD Potência: 18W e 36W Vida útil: 7.500h Tensão: 110V ou 220V (com reator) Temperatura de cor: 4.000K Uso com reator eletrônico |  |  | MASTER LEDtube Potência: 11W e 22W Vida útil: 40.000h Tensão: 100-240V (multitensão) Temperatura de cor: 4.000K ou 6.500K |
|---|---|---|--|---|

Observação: Pela frequência da renovação desta tecnologia os produtos podem sofrer alterações em suas especificações.

ANEXO B - PLANTAS ARQUITETÔNICAS DO EV

Nas folhas em formato A2 apresentadas a seguir, são apresentadas as plantas arquitetônicas do EV, disponibilizadas pela empresa TECVERDE, desenvolvedora do projeto arquitetônico, com as dimensões de cada área demonstrada.