



JORGE AUGUSTO BATASSIM NUNES

**DESENVOLVIMENTO DE SIMULAÇÃO DE GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM USINAS FOTOVOLTAICAS**

LAVRAS – MG

2019

JORGE AUGUSTO BATASSIM NUNES

**DESENVOLVIMENTO DE SIMULAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM USINAS FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Automática da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação para a obtenção do título de bacharel.

APROVADA em 19 de Junho de 2019.

Prof. Dsc. Paulo Vitor Grilo de Souza

Bsc. David Augusto Ribeiro

Prof. Dsc. Fábio Domingues de Jesus
(Orientador)

LAVRAS – MG

2019

*Aos meus pais, Luzia e Salvador, e minha irmã
Angélica.
Pela sabedoria, carinho, atenção e apoio.
Dedico.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela força, atenção, saúde, paciência para alcançar e superar mais essa etapa da minha vida e por nunca ter deixado de estar ao meu lado em qualquer momento.

À toda a minha família, em especial aos meus pais, Luzia e Salvador, pela dedicação, educação, sabedoria, apoio, compreensão e também pela paciência em esperar por esse momento da minha vida.

À Angélica, pelo companheirismo, amizade, e apoio. À minha tia Esmerinda pela sabedoria, atenção e os conselhos. Aos meus primos, Deyvidi, Haruo e Ritoshi, pela amizade e companheirismo.

Ao professor Fábio, pela confiança, por acreditar no meu potencial, pela paciência, compreensão, orientação e incentivo na realização desse trabalho.

A todos os professores do DAT, do DEG e do DCC que participaram da minha formação, pois o conhecimento e a orientação deles foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Aos amigos pela amizade, apoio e companheirismo: Josiane Pavan, Eric Schmiele, Robson Rosserrani, Wederson Geovane, Gabriel Giarolla, Adolfo Cardoso, Andrey Marques, Geraldo Moreira, Guilherme Gonzaga, Ana Damasceno, Vinícius Quilice, Thiago Andrade, David Ribeiro, Anita Moreira, Milena Gomes, Ana Petri, Daniela Vassoleri, Bruna Jordão e Zaira Lavall.

RESUMO

O desenvolvimento de uma simulação para avaliação de um sistema elétrico depende de um conjunto de procedimentos, a começar pela escolha de um software de simulação adequado. O PVSyst (*Photovoltaic System Software*) tem se mostrado um grande aliado a esse tipo de avaliação, sendo utilizado em usinas solares a fim de aferir sua viabilidade e eficiência energética. Este relatório fornece um guia técnico de operação do software bem como analisa e compara o desempenho de dois sistemas reais em operação conectados à rede elétrica da Universidade Federal de Lavras e arredores. A simulação foi realizada na *versão 6.7.0* do programa e investiga a quantidade total de energia elétrica gerada pelas matrizes solares bem como a maneira como as fontes de sombreamento e os próprios elementos elétricos do sistema geram perdas, discutidas ao final do trabalho.

Palavras-Chave: PVSyst, Simulação de usinas solares, Sistemas fotovoltaicos, Sistema on-grid.

ABSTRACT

The development of an evaluation simulation of an electrical system depends on a set of procedures, starting with the choice of a suitable simulation software. PVSyst (Photovoltaic System Software) has proven to be a great ally in this type of evaluation, being used in solar plants to attest its feasibility and energy efficiency. This report provides a technical guide for the software operation as well as analyzes and compares the performance of two actual systems in operation connected to the grid of the Federal University of Lavras and its surroundings. The simulation was carried out in *version 6.7.0* of the program and investigates the total amount of electric energy generated by the solar arrays as well as the way in which the shading sources and the own electrical elements of the system generate losses, discussed at the end of the work.

Keywords: PVSyst, Solar plant simulation, Photovoltaic systems, On-grid system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Geração de energia de várias fontes e sua participação na malha elétrica brasileira	13
Figura 2.2 - Tendência de crescimento da demanda de energia brasileira entre 1970 e 2015 e sua projeção de 2015 a 2050.....	14
Figura 2.3 - Mapa da irradiação solar diária média do Brasil para irradiação horizontal.	15
Figura 2.4 - Diagrama de blocos do sistema fotovoltaico <i>on-grid</i> (sem banco de baterias) em a e <i>off-grid</i> (com banco de baterias) em b	16
Figura 2.5 - Curva operacional característica de um módulo fotovoltaico.....	17
Figura 2.6 - Forma de onda de diferentes tipos de inversores.....	18
Figura 3.1 - Usina fotovoltaica UFLA de 14kWp em Lavras, Minas Gerais.....	22
Figura 3.2 - Diagrama multifilar do sistema de geração fotovoltaica da UFLA.....	23
Figura 3.3 - Usina fotovoltaica ADUFLA de 15kWp em Lavras, Minas Gerais.....	24
Figura 3.4 - Diagrama multifilar do sistema de geração fotovoltaica da ADUFLA.....	25
Figura 4.1 - Interface principal do software PVSyst 6.7.0 – Menu Inicial.....	31
Figura 4.2 - Descrição da opção Databases presente no Menu Inicial	33
Figura 4.3 - Opção <i>Databases</i> do Menu Inicial - Menu Databases.....	34
Figura 4.4 - Opção <i>Geographical sites</i> do Menu Databases - Menu Componente Geográfico.....	35
Figura 4.5 - Opção <i>New</i> do Menu Componente Geográfico - Menu Novo Local.....	36
Figura 4.6 - Segunda aba do Menu Novo Local.....	37
Figura 4.7 - Opção <i>PV modules</i> do Menu Databases - Menu Componente Módulo.....	38
Figura 4.8 - Opção <i>Grid inverter</i> do Menu Databases - Menu Componente Inversor.....	39
Figura 4.9 - Descrição da opção <i>Project Design</i> presente no Menu Inicial.....	40
Figura 4.10 - Opção <i>Grid-Connected</i> do Menu Inicial - Menu Novo Projeto.....	41
Figura 4.11 - Opção <i>Orientation</i> do Menu Novo Projeto - Menu Orientação.....	42
Figura 4.12 - Opção <i>System</i> do Menu Novo Projeto - Menu Sistema.....	43
Figura 4.13 - Opção <i>Near Shadings</i> do Menu Novo Projeto - Menu Modelo.....	45
Figura 4.14 - Modelo tridimensional da usina fotovoltaica UFLA.....	46
Figura 4.15 - Modelo tridimensional da usina fotovoltaica ADUFLA.....	46
Figura 4.16 - Opção <i>Run Simulation</i> do Menu Novo Projeto - Menu Simulação (em execução).....	47
Figura 5.1 - Produção de energia elétrica por kWp instalado na usina fotovoltaica UFLA.....	51
Figura 5.2 - Produção de energia elétrica por kWp instalado na usina fotovoltaica ADUFLA.....	51
Figura 5.3 - Índice de desempenho da usina fotovoltaica UFLA.....	52
Figura 5.4 - Índice de desempenho da usina fotovoltaica ADUFLA.....	52
Figura 5.5 - Diagrama anual de perdas sobre a usina fotovoltaica UFLA.....	53
Figura 5.6 - Diagrama anual de perdas sobre a usina fotovoltaica ADUFLA.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Especificações dos módulos solares da usina fotovoltaica UFLA.....	22
Tabela 3.2 - Especificações dos inversores de energia da usina fotovoltaica UFLA.....	23
Tabela 3.3 - Especificações dos módulos solares da usina fotovoltaica ADUFLA.....	24
Tabela 3.4 - Especificações dos inversores de energia da usina fotovoltaica ADUFLA...	25
Tabela 4.1 - Valores de preenchimento do Menu Novo Local.....	36
Tabela 4.2 - Valores de preenchimento da segunda aba do Menu Novo Local.....	37
Tabela 4.3 - Valores de preenchimento do Menu Componente Módulo.....	39
Tabela 4.4 - Valores de preenchimento do Menu Componente Inversor.....	40
Tabela 4.5 - Valores de preenchimento do Menu Orientação.....	43
Tabela 4.6 - Valores de preenchimento do Menu Sistema para a usina fotovoltaica UFLA.....	44
Tabela 4.7 - Valores de preenchimento do Menu Sistema para a usina fotovoltaica ADUFLA.....	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1 - Balanços e principais resultados da usina fotovoltaica UFLA (14 kWp).....	49
Quadro 5.2 - Balanços e principais resultados da usina fotovoltaica ADUFLA (15 kWp).....	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1	Energia solar no Brasil.....	12
2.2	Elementos elétricos de uma usina fotovoltaica.....	14
2.2.1	Módulos fotovoltaicos.....	16
2.2.2	Inversores de energia.....	17
2.3	Revisão de Literatura.....	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1	Descrição das usinas fotovoltaicas conectadas à rede.....	21
3.1.1	Usina fotovoltaica UFLA.....	21
3.1.2	Usina fotovoltaica ADUFLA.....	23
3.2	Análise de performance de parâmetros fotovoltaicos	25
3.2.1	Parâmetros de Rendimento.....	26
3.2.1.1	Rendimento de referência.....	26
3.2.1.2	Rendimento da matriz.....	27
3.2.1.3	Rendimento final do sistema.....	27
3.2.1.4	Índice de desempenho.....	28
3.2.2	Parâmetros de perda.....	28
3.2.2.1	Perdas de captura da matriz.....	28
3.2.2.2	Perdas do sistema.....	29
4	DESENVOLVIMENTO DA SIMULAÇÃO NO PVSYSY.....	29
4.1	Levantamento de informações necessárias à simulação.....	31
4.2	Adequação do banco de dados do software.....	32
4.2.1	Dados geográficos e meteorológicos.....	34
4.2.2	Módulos fotovoltaicos e inversores.....	38
4.3	Criação de projeto conectado à rede.....	40
4.4	Customização do sistema a ser simulado.....	42
4.4.1	Orientação	42
4.4.2	Sistema.....	43
4.4.3	Modelo tridimensional.....	45
4.5	Realização da simulação e análise de resultados.....	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
5.1	Resultados principais da simulação.....	48
5.2	Balanco e resultados principais.....	48
5.3	Produção normalizada.....	50
5.4	Índice de desempenho.....	52
5.5	Diagrama de perdas.....	53
6	CONCLUSÕES.....	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Nos anos recentes, a energia renovável desempenhou um papel vital na produção de diversas malhas energéticas ao redor do mundo, e se tornou uma das mais significativas fontes de energia usada para geração de eletricidade que não empregam combustíveis fósseis, como gas, petróleo e carvão mineral.

A prática reduz a poluição ambiental, diminui a emissão de gases do efeito estufa e previne a ocorrência do aquecimento global; acrescido a isso, há a diminuição no preço dos combustíveis convencionais, estimulando o fomento de novas políticas energéticas.

A tecnologia fotovoltaica solar é um dos mais importantes recursos de energia renovável, em termos de disponibilidade; devido a isso, é crucial o desenvolvimento de ferramentas de software capazes de determinar a energia em potencial a ser gerada, suas características e seu eficaz desempenho no emprego de sistemas fotovoltaicos. Este passo auxilia na comparação de performance e custo de produção de energia sob diferentes configurações do sistema.

A Universidade Federal de Lavras (latitude 21.23° S, longitude 44.97° W), localizada na cidade de Lavras, Minas Gerais, possui hoje 6 plantas solares instaladas ao longo de seu campus em resposta ao uso consciente de energia elétrica, reduzindo a lacuna entre demanda e fornecimento de eletricidade bem como os gastos para manter o funcionamento diário de sua malha elétrica. Dentre estas, duas delas são alvo para o presente relatório: uma localizada no Departamento de Engenharia (aqui referida como usina fotovoltaica UFLA), com 14 kWp (quilowatt pico) de potência e a outra na Associação de Docentes da UFLA (citada como usina fotovoltaica ADUFLA), contando com 15 kWp.

No presente estudo, a análise de desempenho e previsão das duas plantas citadas é realizada para demonstrar como se dá o processo de simulação de usinas solares, estudando, assim, sua eficácia na geração de energia. Uma comparação dos parâmetros de desempenho avaliados para estas usinas fotovoltaicas também é apresentado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Excluindo os poucos países desenvolvidos, a maioria dos países do mundo tem escassez de energia. As últimas décadas foram marcadas pelo esgotamento de enormes quantidades de recursos naturais devido às atividades antrópicas, agravando todos os níveis de poluição do ambiente. A preocupação global com a proteção ambiental e o alto preço dos produtos petrolíferos despertou o exame, a integração e o desenvolvimento de todas as fontes renováveis de energias alternativas, inclusive a solar, com melhor tecnologia para diversificar ao máximo o aproveitamento da matriz energética; um dos bons exemplos de tal tecnologia é o sistema fotovoltaico ligado à rede de distribuição (KUMAR et al., 2017).

A geração de energia elétrica pelo sistema solar fotovoltaico não é tão consistente e consolidada em comparação com a energia gerada em usinas hidrelétricas e termoelétricas. Entretanto, as plantas solares ligadas à rede facilitam a utilização da energia da rede e do próprio sistema fotovoltaico. Esse é o principal fator motivador para sua exploração.

2.1 Energia solar no Brasil

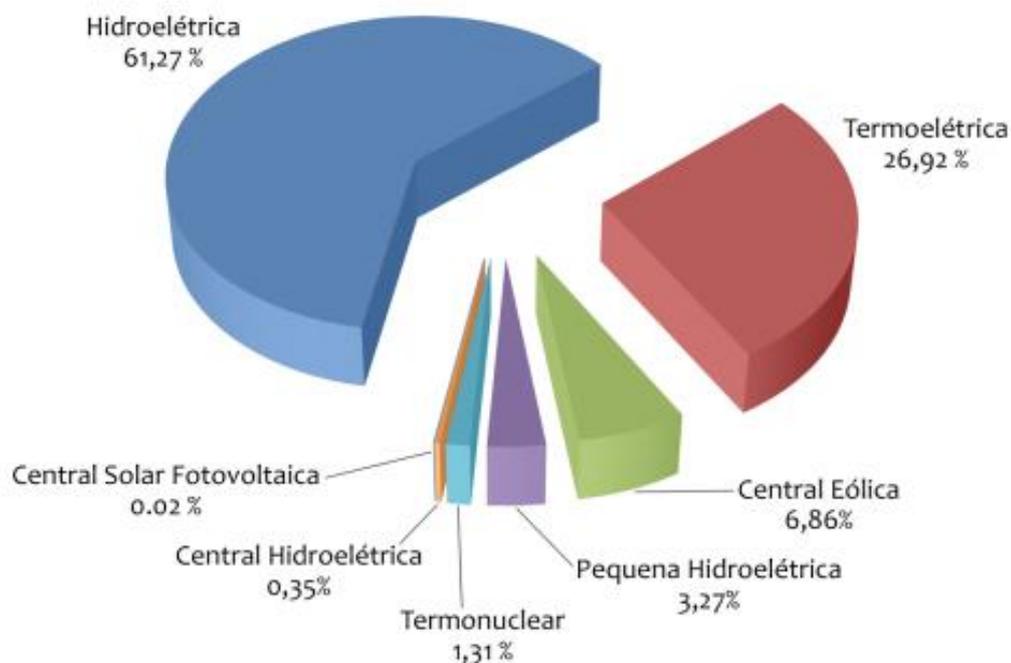
Entre as fontes de energia renováveis, a energia solar ganhou mais atenção em meados da atual década em território brasileiro, tendo ampla disponibilidade de áreas passíveis de exploração por usinas solares (PEREIRA et al., 2017).

Dados referentes ao ano de 2017 revelam que um montante de 152 GW foram adicionados à malha elétrica brasileira proveniente somente de energias renováveis, dentre as quais estão as consideradas intermitentes – devido à variabilidade temporal elevada proveniente das condições às quais se submete a planta – eólica e centrais solares fotovoltaicas. A geração de eletricidade no Brasil está firmemente baseada em hidroelétricas e termoelétricas, como mostrado na Figura 2.1.

A tendência do crescimento do consumo de energia total nacional nas últimas décadas e projetada para as demais é observada na Figura 2.2. Como a matriz atual está fortemente dependente de usinas hidroelétricas e termoelétricas, o Brasil precisará reestruturar seu planejamento energético para suprir essa demanda, buscando instalações de geração não somente de mais fácil implantação como também em mais locais que independam de recursos naturais, como combustíveis e cursos d'água. Assim, é importante diversificar a

matriz energética brasileira inserindo fontes de energia renováveis para permitir que o país atenda às necessidades energéticas de longo prazo.

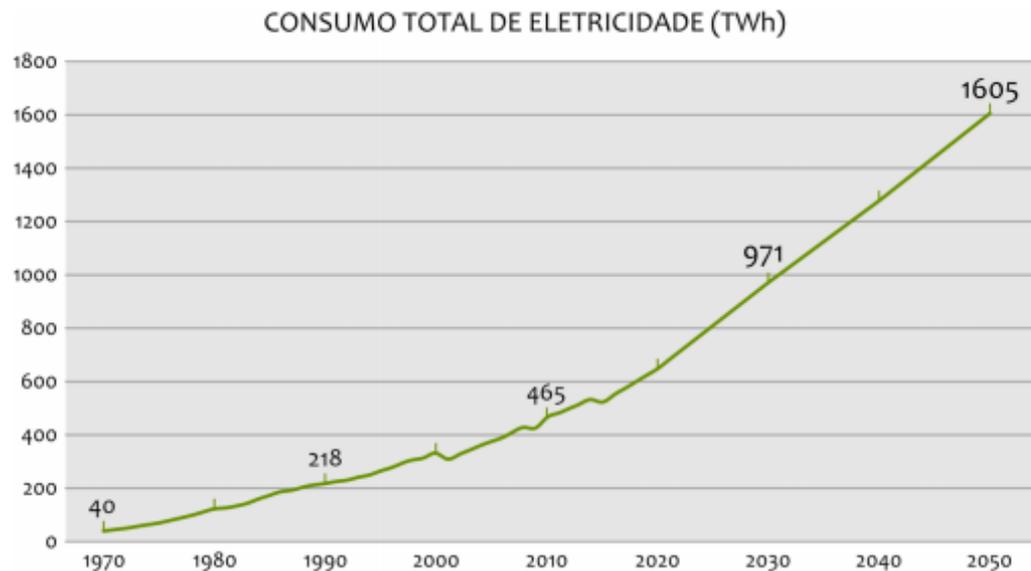
Figura 2.1 - Geração de energia de várias fontes e sua participação na malha elétrica brasileira.



Fonte: Pereira et al., 2017

Desde 2001, um projeto intitulado SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), realizado a partir da união entre DMA (Divisão de Clima e Meio Ambiente), CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos), INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia, o atual Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC) enquadra em seu escopo a reunião de informações meteorológicas acerca da incidência de raios solares e demais informações pertinentes ao aproveitamento dessa fonte limpa de energia para fomentar a implantação de usinas solares ao longo do território nacional (PEREIRA et al., 2006).

Figura 2.2 - Tendência de crescimento da demanda de energia brasileira entre 1970 e 2015 e sua projeção de 2015 a 2050.



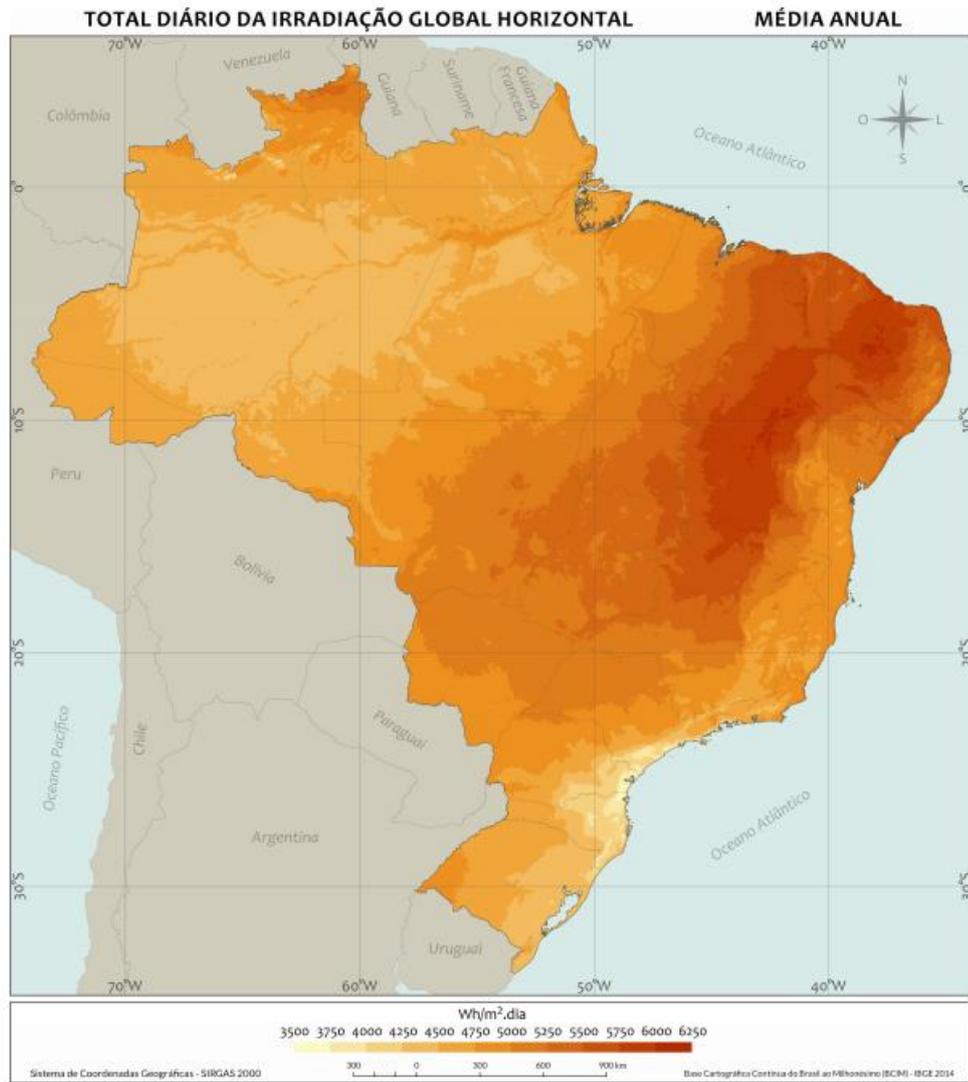
Fonte: Pereira et al., 2017

Cerca de 4951 Wh/m^2 é o total incidente de raios luminosos sobre a área da região Sudeste do Brasil mensalmente (PEREIRA et al., 2017). O Atlas Brasileiro de Energia Solar emitido em 2017 mostra o panorama da irradiação horizontal sobre o território nacional demonstrado na Figura 2.3. Ele demonstra um vasto potencial de energia solar inexplorado. Uma pequena fração do total da energia incidente, se capturada de forma eficaz, pode atender a todos os requisitos de energia do país.

2.2 Elementos elétricos de uma usina fotovoltaica

Espera-se que a eficiência de conversão de energia de uma usina conectada à rede seja a máxima possível, uma vez que é necessário armazenar energia elétrica e o excedente de energia gerada é injetada diretamente à rede elétrica. Tais sistemas são fáceis de instalar, operar e manter e os investimentos para implantação possuem períodos de retorno mais rápidos.

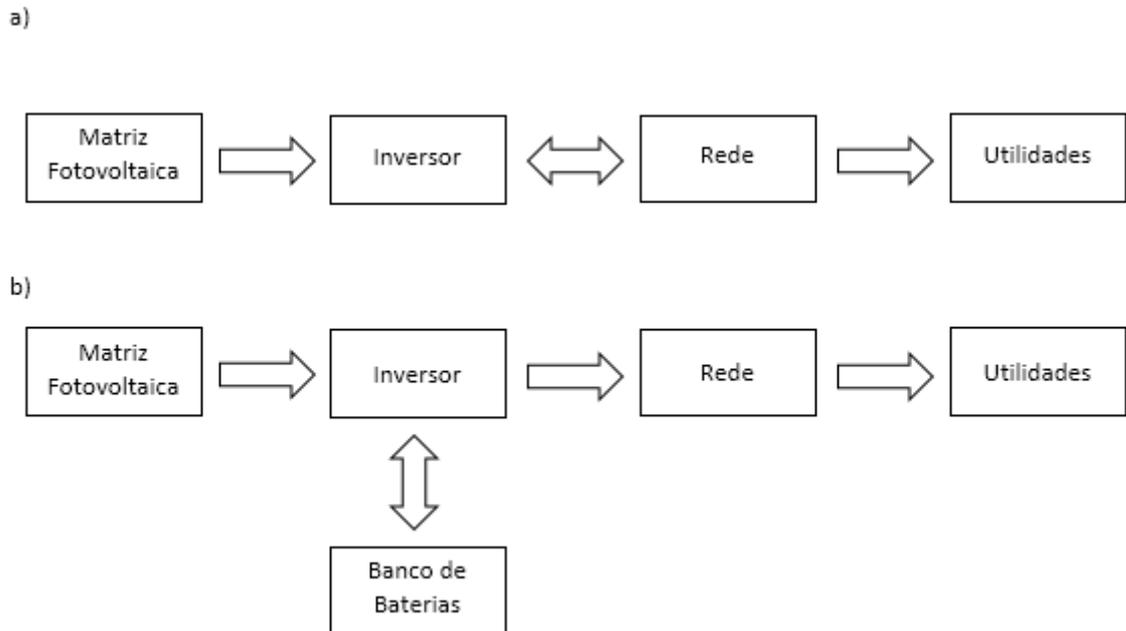
Figura 2.3 - Mapa da irradiação solar diária média do Brasil para irradiação horizontal.



Fonte: Pereira et al., 2017

Existem dois tipos de sistemas fotovoltaicos ligados à rede, sendo a diferença entre eles a existência de um banco de baterias ou não. Este componente geralmente está presente em sistemas de menor demanda de energia, e estará totalmente focado em manter o nível de carga operacional dos inversores, que atuarão também na recarga desse banco (KUMAR et al., 2017). A Figura 2.4 resume os dois estados

Figura 2.4 - Diagrama de blocos do sistema fotovoltaico *on-grid* (sem banco de baterias) em a e *off-grid* (com banco de baterias) em b.



Fonte: Do autor

Para o presente estudo, o banco de baterias não será considerado, priorizando os módulos fotovoltaicos e os inversores de energia.

2.2.1 Módulos fotovoltaicos

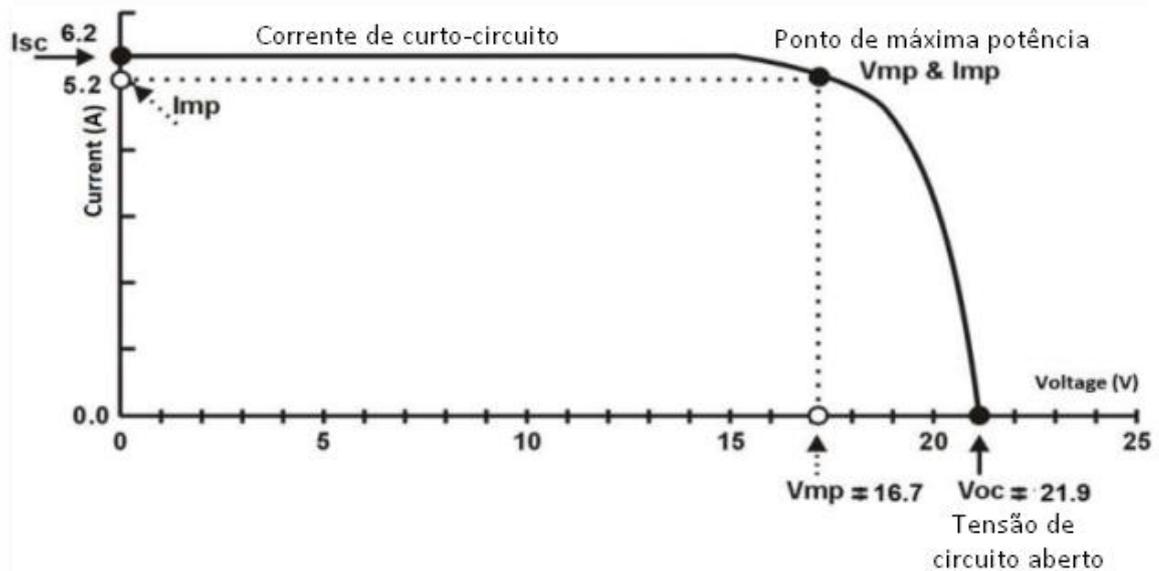
A energia solar está geralmente presente na forma de radiação. As células fotovoltaicas funcionam no princípio do efeito fotoelétrico; a luz incidida sobre as células solares é convertida em energia elétrica. A captura de raios luminosos é feita por materiais semicondutores em células, as quais, genericamente, conferem cerca de 0,5 V de geração em operação normal, e um grande número de células solares é conectada em série e em paralelo, formando um módulo, para atender aos requisitos de tensão e corrente do sistema. A conexão de diversos módulos configuram matrizes fotovoltaicas, e a classificação dos mesmos é dada pela saída (ou potência) máxima que é capaz de gerar.

A energia produzida por um dado módulo fotovoltaico depende majoritariamente do material fotovoltaico e da incidência de raios solares sobre o mesmo. Através do tempo, a geração de energia elétrica do componente tende a decair (comumente devido a fatores

ambientais como umidade, ciclos térmicos, radiação ultravioleta, etc.), simultaneamente a degradações permanentes, como corrosão, descoloração, delaminação e rachaduras nas células do sistema. Outro fator que influencia diretamente na redução da produção de energia elétrica do módulo fotovoltaico temporariamente é o acúmulo de poeira, perda que pode ser corrigida mediante ações de limpeza dos módulos (MANI et al., 2010). A poeira depositada sobre o módulo dissipa sua iluminação devido à dispersão da luz solar recebida pelo mesmo, reduzindo a performance de produção de energia (ELMINIR et al., 2006).

A saída de um módulo solar depende do número de células que o compõe, o tipo de material e a área superficial total que cobrem; essa saída muda dependendo da quantidade de radiação solar, do ângulo do módulo em relação ao sol, da temperatura do módulo e da tensão na qual a carga está consumindo energia do módulo. A curva corrente-tensão (I-V) verificada em um módulo solar genérico sob condições de teste padrão - STC (*Standard Test Conditions*; 1000 W/m^2 , $25 \text{ }^\circ\text{C}$) é mostrada na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Curva operacional característica de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Mani et al., 2010

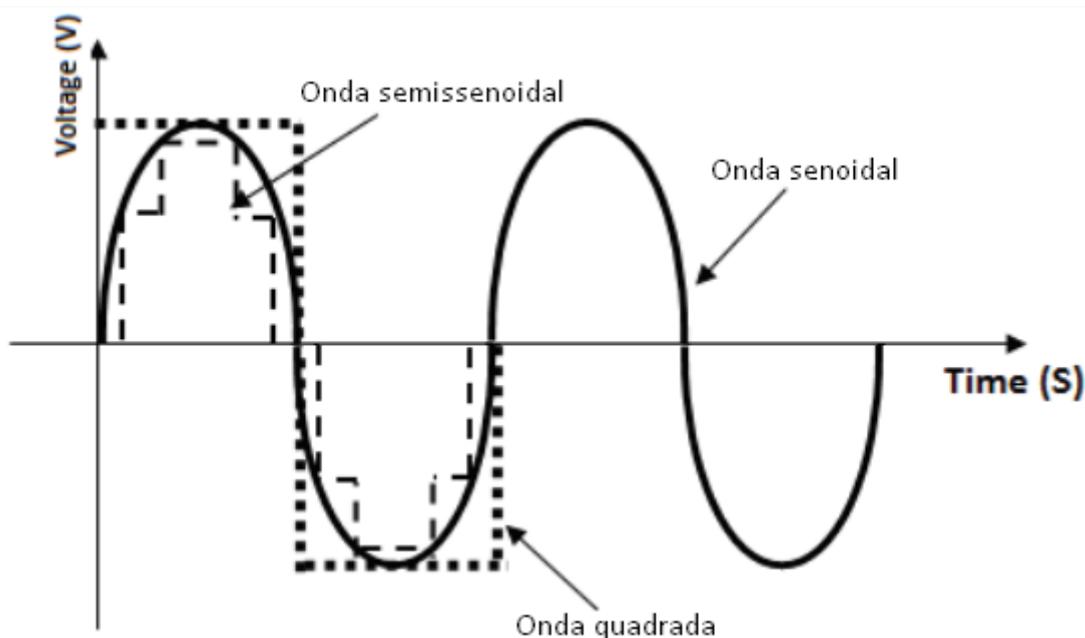
2.2.2 Inversores de energia

O inversor recebe energia em tensão contínua proveniente dos módulos bem como de eventuais baterias conectadas e converte em tensão alternada, introduzindo a mesma na rede elétrica para distribuição e utilização. Há uma ampla gama de inversores disponível

no mercado para atender a demanda dos clientes e as diversas configurações exigidas pelo sistema. Dependendo da forma do sinal de saída, o inversor é categorizado em três tipos de onda: quadrada, semissenoidal ou senoidal como mostrado na Figura 2.6.

Uma característica importante dos inversores é o número de entradas de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), responsáveis pela implementação do rastreamento do ponto de máxima potência coletada pelos painéis solares. A existência de duas dessas entradas possibilita, por exemplo, que o inversor busque o ponto de máxima potência para um grupo menor de módulos solares, diminuindo perdas por efeito de sombreamento (BRITO, 2017).

Figura 2.6 - Forma de onda de diferentes tipos de inversores.



Fonte: Mani et al., 2010

2.3 Revisão de literatura

A seguir, são mostrados 10 trabalhos anteriores relacionados ao desempenho e análise de viabilidade de implantação de usinas solares desenvolvidas no ambiente do PVSyst.

Karki et al. (2012) apresenta um estudo de performance de um mesmo sistema fotovoltaico conectado à rede em Kathmandu (Nepal) e Berlim (Alemanha) usando o PVSyst. O sistema de 60 kWp foi simulado com os parâmetros meteorológicos relativos às

duas cidades, analisando a energia gerada pela planta bem como a energia injetada na rede. Diversas perdas possíveis também foram mostradas.

Kandasamy et al. (2013) desenvolve um estudo quanto ao potencial solar disponível via PVSyst para quatro condições geográficas ao sul da Índia, no estado de Tamil Nadu. O sistema executa a coleta de 1000 kWp em adição à rede, sobre o qual são analisados rendimento total do sistema, índice de desempenho, eficiência da malha de módulos fotovoltaicos e custos de outros parâmetros.

Sharma et al. (2013) conduz um estudo detalhado com respeito à usina fotovoltaica de 190 kWp instalada em Khatkar-Kalan, na Índia. Tal estudo mostra um parecer comparativo de performance entre os resultados da simulação feita no PVSyst e coletas diretas da planta. A base de parâmetros é anual, reportando o índice de desempenho, o fator de capacidade e a eficiência do sistema respectivamente iguais a 74%, 9,27% e 8,3%. Uma diferença mínima é detectada no procedimento, entre a energia medida (812,76 kWh/kWp) e a simulação via software (823 kWh/kWp).

Um sistema fotovoltaico autossuficiente de 2 kWp é proposto, simulado e analisado por Bouzguenda et al. (2014). Nesse estudo, o efeito de sombreamento devido às construções próximas e árvores sobre a planta é levado em consideração, determinando um limite máximo de influência desses eventos sobre a performance da geração de energia.

Meriem et al. (2014) utiliza o PVSyst para um estudo simulado de um sistema fotovoltaico conectado à rede de 9,9 kWp. A simulação busca um design otimizado, considerando a inclinação e a direção dos módulos da usina solar, avaliando o índice de desempenho e estimando a energia total gerada.

Yadav et al. (2015) apresenta uma simulação de performance de uma usina solar indiana de 1 kWp na cidade de Hamirpur. O índice de desempenho é aferido em 72,4%, além de medir a energia fornecida à carga e as perdas do sistema, também simuladas via PVSyst.

Tallab et al. (2015) simula a performance de uma usina solar de 1 MWp interconectada à rede de distribuição de Aïn Melh M'sila, na Argélia. Análises de performance são feitas tanto para uma inclinação fixa do sistema quanto para ajustes sazonais de angulação ao longo do ano simulado. Os resultados do estudo exploram as possíveis variações de energia entre as duas configurações do sistema.

Trabalhos conduzidos por Kumar et al. (2015) no PVSyst sobre uma planta solar de 10 MWp instalada em Ramagundam, no estado indiano de Telangana, mostram dados muito correlatos com o monitoramento real da potência do sistema.

Um design otimizado de um sistema fotovoltaico autossuficiente é desenvolvido por Irwan et al. (2015) através da ferramenta de simulação do PVSyst para prever sua performance. Dados anuais de avaliação de desempenho são mostrados em termos de geração de energia anual (841,31 kWh) e energia cedida à carga (735,84 kWh).

Matiyali et al. (2016) executa o estudo performático prévio no PVSyst de uma usina solar de 400 kWp conectada à rede para a posterior implantação em Dhalipur, na Índia. Tal estudo atesta a viabilidade do sistema, fornecendo um índice de desempenho de 78,1% com um aproveitamento diário variando entre 3,14 e 5,65 kWh/kWp/dia.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo de simulação de uma rede planejada conectada ao sistema fotovoltaico é tecnicamente dimensionado de acordo com as especificações do projeto e o mesmo é simulado usando a ferramenta de software PVSyst. Este modelo inclui informações dimensionais, meteorológicas, especificações elétricas dos equipamentos e a correta adição de toda a coleta de informação no software. O procedimento para adquirir essas informações nas usinas solares visitadas é feito nessa seção para preparar a simulação na seção posterior.

3.1 Descrição das usinas fotovoltaicas conectadas à rede

Nessa sessão, são mostrados os elementos das plantas solares visitadas e informações necessárias para a posterior simulação. Para tanto, não somente informações técnicas contidas nos sites dos fabricantes de equipamentos são requeridas, mas também medições locais da dimensão de equipamentos, construções próximas, vegetação e quaisquer outras fontes de sombreamento relevantes. Também é importante aferir quaisquer inclinações de terreno, dos módulos fotovoltaicos e seu posicionamento angular no azimute (ângulo com relação ao Sul geográfico – igual a 0° quando os módulos estão voltados para o Norte).

Devido à proximidade geográfica entre as duas estações (diferença de cerca de 3 km entre si), a localização é considerada a mesma para fins de adequação meteorológica e demais dados pertinentes à simulação (21.23° S, 44.97° W).

Os dados de dimensionamento da usina e de seus arredores serão melhor trabalhados na etapa de simulação, mas é importante ressaltar sua importância ainda na etapa de coleta de informações. Para tanto, foi necessário uma tréna no dia da visita e algumas imagens de GPS obtidas posteriormente.

3.1.1 Usina fotovoltaica UFLA

A usina fotovoltaica UFLA conectada à malha elétrica da Universidade Federal de Lavras de potencial 14 kWp foi instalada no Departamento de Engenharia do campus. A usina é mostrada na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Usina fotovoltaica UFLA de 14kWp em Lavras, Minas Gerais.



Fonte: Do autor

O sistema de painéis solares conta com 250 células de 54 W, divididos em 3 submatrizes de 92, 92 e 66 módulos inclinadas em 43° e com face voltada ao Norte, cada uma conectada a um inversor monofásico. Tais painéis possuem características técnicas sumarizadas na Tabela 3.1.

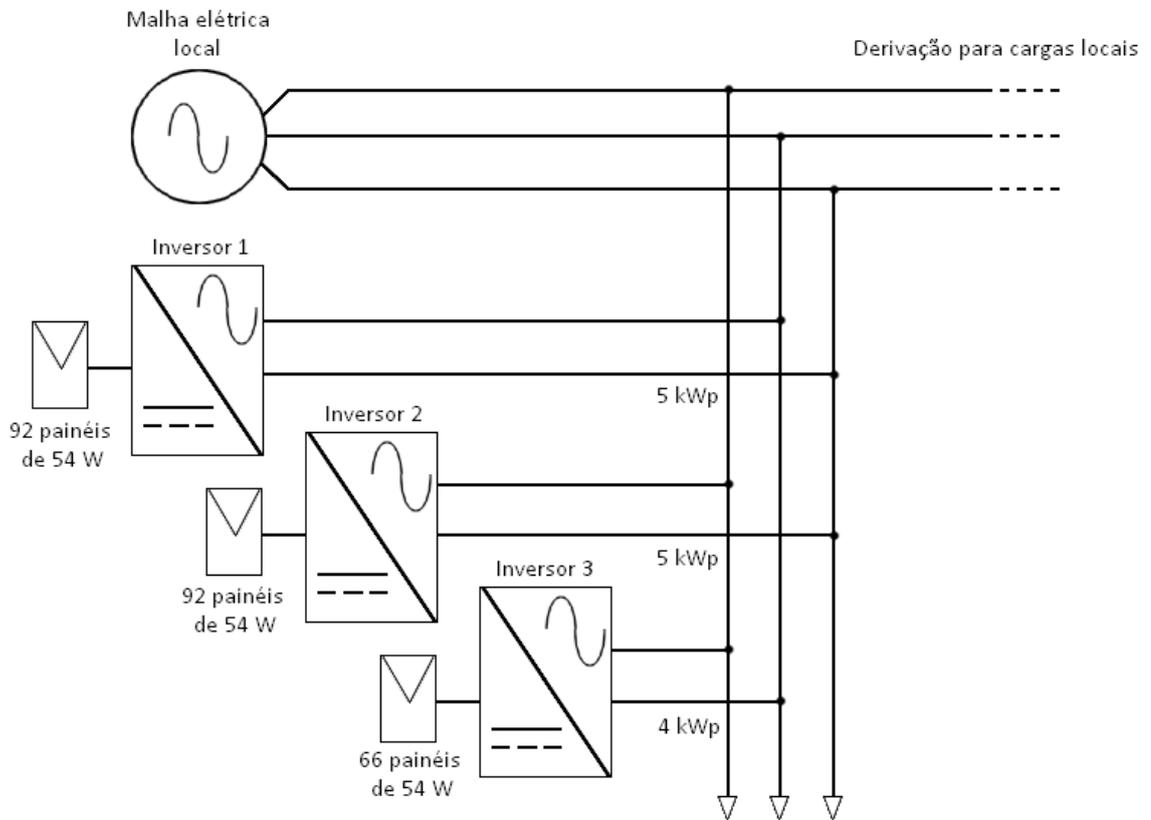
Tabela 3.1 - Especificações dos módulos solares da usina fotovoltaica UFLA.

Característica	Informações técnicas
Fabricante	Kyocera
Modelo	KC50T
Potência Máxima	54 W
Tensão de Máxima Potência	17.4 V
Corrente de Máxima Potência	3.11 A
Material	Silício policristalino

Fonte: Do autor

Os inversores somam potência total de 14 kWp, sendo conectados fase-fase e distribuídos entre as três fases da rede elétrica conforme mostrado no diagrama multifilar contido na Figura 3.2. Tais inversores possuem informações técnicas sumarizadas na Tabela 3.2.

Figura 3.2 - Diagrama multifilar do sistema de geração fotovoltaica da UFLA.



Fonte: Do autor

Tabela 3.2 - Especificações dos inversores de energia da usina fotovoltaica UFLA.

Característica	Informações técnicas	
	Inversores 1 e 2	Inversor 3
Fabricante	Fronius	Fronius
Modelo	Primo 5.0-1	Primo 4.0-1
Potência CA	5 kW	4 kW
Tensão CA Nominal	220/230 V	220/230 V
Corrente CA Máxima	22.9 A	18.3 A
Eficiência Máxima	98%	97.7%
Número de Entradas	2 MPPTs	2 MPPTs

Fonte: Do autor

3.1.2 Usina fotovoltaica ADUFLA

A usina fotovoltaica ADUFLA foi montada em uma área de lazer na fronteira norte dos arredores da Universidade Federal de Lavras, portando um potencial de 15 kWp. A usina é mostrada na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Usina fotovoltaica ADUFLA de 15kWp em Lavras, Minas Gerais.



Fonte: Do autor

O sistema de painéis solares conta com 50 células de 330 W, divididos em 3 submatrizes de 16, 18 e 16 módulos inclinadas em 21° e com face voltada ao Norte, cada uma conectada a um inversor monofásico. Tais painéis possuem características técnicas sumarizadas na Tabela 3.3.

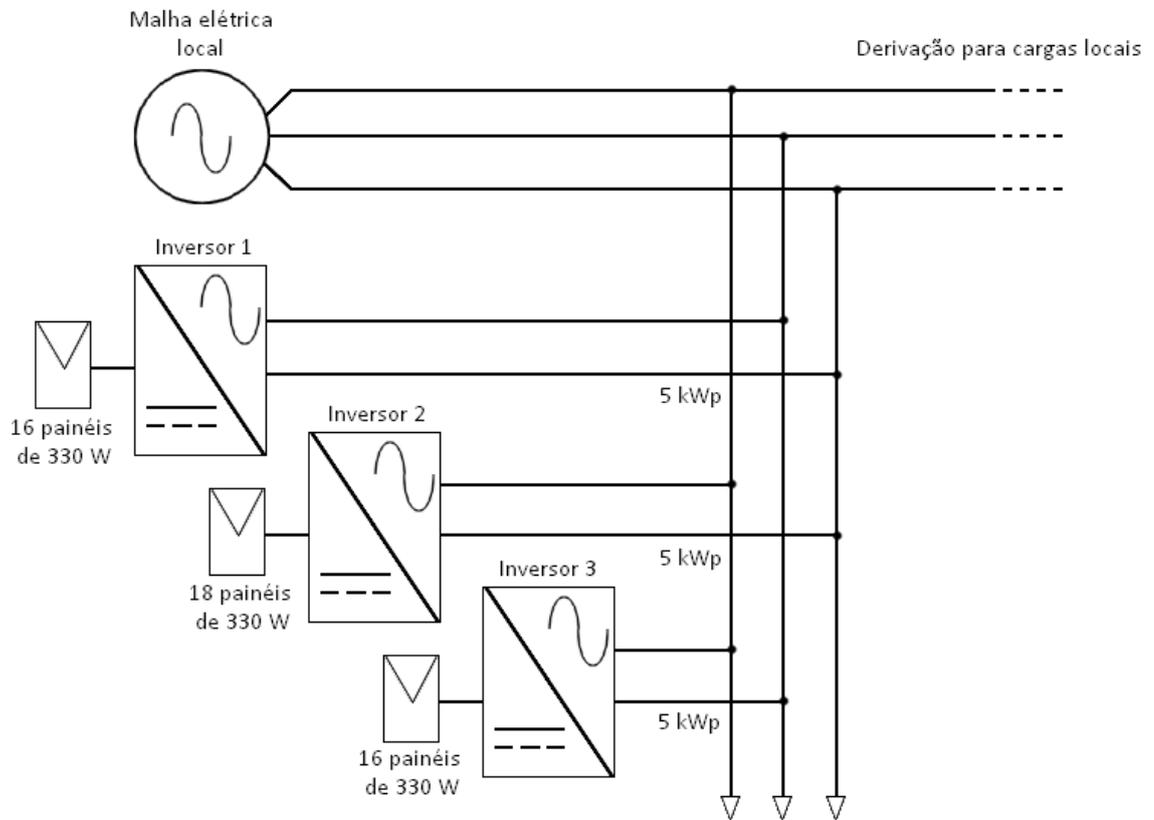
Tabela 3.3 - Especificações dos módulos solares da usina fotovoltaica ADUFLA.

Característica	Informações técnicas
Fabricante	Jinko Solar
Modelo	JKM 330PP-72-V
Potência Máxima	330 W
Tensão de Máxima Potência	37.8 V
Corrente de Máxima Potência	8.74 A
Material	Silício policristalino

Fonte: Do autor

Os inversores somam potência total de 15 kWp, também conectados fase-fase e distribuídos entre as três fases da rede elétrica conforme mostrado no diagrama multifilar contido na Figura 3.4. Tais inversores possuem informações técnicas sumarizadas na Tabela 3.4.

Figura 3.4 - Diagrama multifilar do sistema de geração fotovoltaica da ADUFLA.



Fonte: Do autor

Tabela 3.4 - Especificações dos inversores de energia da usina fotovoltaica ADUFLA.

Característica	Informações técnicas
Fabricante	PHB Eletrônica
Modelo	PHB5000-D-NS
Potência CA	5 kW
Tensão CA Nominal	220 V
Corrente CA Máxima	22.8 A
Eficiência Máxima	98%
Número de Entradas	2 MPPTs

Fonte: Do autor

3.2 Análise da performance de parâmetros fotovoltaicos

A *International Energy Agency* (IEA) determinou parâmetros de desempenho para analisar a eficiência de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Tais parâmetros seriam suficientes para formar uma análise prévia de viabilidade completa do sistema, incluindo

parâmetros de rendimento e parâmetros de perdas. Para este relatório, ambos são discutidos a seguir, evidenciando quais serão mais relevantes.

3.2.1 Parâmetros de rendimento

A IEA inclui como parâmetros de viabilidade de implantação de usinas solares os seguintes valores (KARKI, 2012):

- Rendimento de referência;
- Rendimento da matriz;
- Rendimento final do sistema;
- Índice de Desempenho;
- Eficiência do inversor;
- Eficiência do sistema;
- Energia injetada na rede; e
- Fator de capacidade.

Neste trabalho, os quatro primeiros são mais relevantes, sendo explicados nos próximos tópicos.

3.2.1.1 Rendimento de referência

É representado pela notação Y_r e é a quantidade total de energia produzida no sistema quando se diz que o sistema está funcionando com eficiência nominal. Essa eficiência nominal é predefinida pelos fabricantes de matrizes solares no STC (condições de teste padrão), verificada nos detalhes da placa de identificação. É representada matematicamente como a razão entre a irradiância horizontal total e a irradiância global no STC. A fórmula é expressa como:

$$Y_r = \frac{H_t}{G_0}$$

onde:

- Y_r é o rendimento de referência;
- H_t é a irradiância total em um plano horizontal em kWh/m²/dia; e
- G_0 é a irradiância global no STC.

3.2.1.2 Rendimento da matriz

É definida como a quantidade de energia DC produzida pela matriz fotovoltaica, e é expressa pela notação Y_a . Provém da relação entre a energia gerada a partir da matriz fotovoltaica e a potência nominal da matriz fotovoltaica. Seu cálculo é descrito como:

$$Y_a = \frac{E_{DC}}{P_0}$$

onde:

- Y_a é o rendimento da matriz;
- E_{DC} é a saída de energia DC do painel fotovoltaico em kWh; e
- P_0 é a potência nominal do painel fotovoltaico no STC.

A saída de energia do módulo solar é dada por:

$$E_{DC} = V_{DC} \cdot I_{DC} \cdot t$$

onde:

- V_{DC} é a tensão de saída CC do gerador fotovoltaico em volts;
- I_{DC} é a corrente de saída CC do painel fotovoltaico em amperes; e
- t é o tempo em horas.

3.2.1.3 Rendimento final do sistema

É representado pela notação Y_f e é a quantidade de energia injetada na rede em base anual, mensal ou diária. Define-se como a relação entre a saída de energia CA do sistema fotovoltaico (saída no terminal do inversor) e a potência máxima, ou seja, por kWh instalado no painel fotovoltaico no STC. A fórmula é expressa como:

$$Y_f = \frac{E_{AC}}{P_P}$$

onde:

- Y_f é o rendimento final do sistema em kWh/kWp/dia;

- E_{AC} é a saída de energia CA do sistema fotovoltaico, ou seja, a saída do inversor em kWh; e
- P_p é a potência de pico do painel fotovoltaico no STC.

3.2.1.4 Índice de desempenho

Considerado o valor de maior interesse em se tratando de instalações de usinas solares, pode ser definido como a relação entre o rendimento final do sistema e o rendimento de referência, sendo possível chegar ao mesmo resultado denotando a relação entre a energia injetada na rede e a potência nominal mencionada nos detalhes da placa de identificação do painel fotovoltaico. É expressa pela notação PR . Seu cálculo é descrito como:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} = \frac{E_{Grid}}{Glob_{Inc}}$$

onde:

- Y_f é o rendimento final do sistema;
- Y_r é o rendimento de referência;
- E_{Grid} é a injeção de energia AC na rede em MWh ou kWh; e
- $Glob_{Inc}$ é o incidente global no plano de coleta do painel.

3.2.2 Parâmetros de perda

Além dos parâmetros de desempenho, investigar o montante de gastos e perdas à priori é de suma importância para atestar a viabilidade de uma nova instalação solar. As perdas são possíveis em quase todos os componentes usados durante o projeto do sistema fotovoltaico conectado à rede, sendo as mais importantes para esse trabalho as perdas de captura da matriz e as perdas do sistema.

3.2.2.1 Perdas de captura da matriz

A primeira forma de perda analisada ocorre principalmente no arranjo fotovoltaico devido a vários fatores, como aumento de temperatura da célula solar, sombra parcial,

acúmulo de poeira sobre o painel e erros por maximização do ponto de potência e operação. É representada com a notação L_C sendo a diferença do rendimento de referência para o rendimento da matriz. A fórmula que descreve a perda é dada por:

$$L_C = Y_r - Y_a$$

onde:

- L_C é a perda de captura da matriz;
- Y_r é o rendimento de referência; e
- Y_a é o rendimento da matriz.

3.2.2.2 Perdas do sistema

Origina-se da conexão entre o sistema do inversor e outros componentes elétricos usados para integração da rede, inclusive dos módulos solares. É denotado por L_S sendo a diferença entre o rendimento da matriz e o rendimento final do sistema. O cálculo é expresso como:

$$L_S = Y_a - Y_f$$

onde:

- L_S é a perda do sistema;
- Y_a é o rendimento da matriz; e
- Y_f é o rendimento final do sistema.

4 DESENVOLVIMENTO DA SIMULAÇÃO NO PVSYS

A saída de energia do sistema fotovoltaico pode ser estimada usando vários softwares de simulação de sistemas fotovoltaicos. Steve (2010) estudou cinco softwares de simulação de plantas fotovoltaicas para investigar a sensibilidade desses programas a mudanças de incidência luminosa e elevação máxima de temperatura, concluindo que a diferença entre os rendimentos normalizados pode ser grande. O fato é atribuído aos valores de resistência dos módulos fotovoltaicos modelados, que tendem a aumentar em situações de baixa luminosidade, gerando valores erráticos. Na comparação, o PVSyst (*Photovoltaic System*

Software) demonstrou maior proximidade com dados coletados da planta real da qual derivou a simulação.

Ferramentas de software relacionadas a sistemas fotovoltaicos podem ser classificadas em 4 categorias: verificação de viabilidade, dimensionamento, simulação e ferramentas abertas de pesquisa, dependendo do propósito do software (TURCOTTE, 2001). O PVSyst é um pacote de software que engloba as quatro classificações mencionadas, compondo-se de recursos para estudo, dimensionamento e análise de dados de sistemas fotovoltaicos completos.

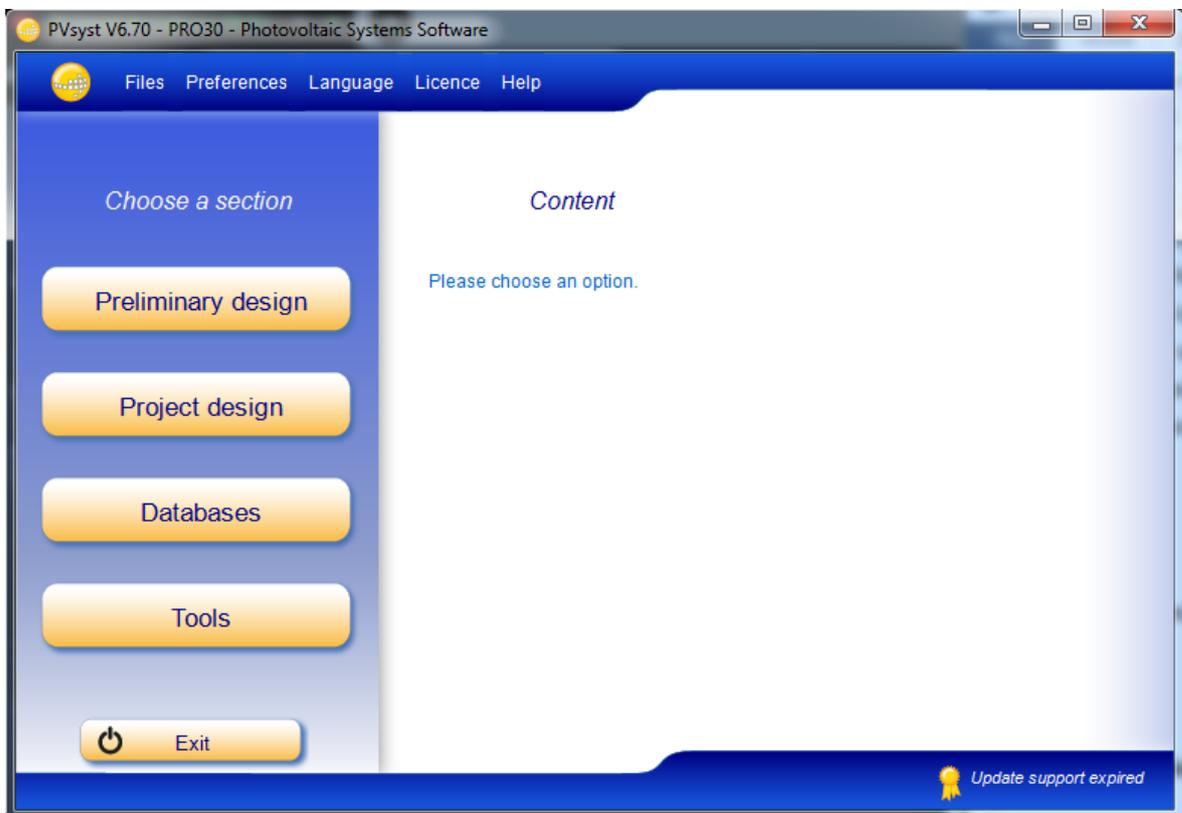
PVSyst é a ferramenta mais avançada para modelo e análise de sistemas solares fotovoltaicos para diversas aplicações (como conexão direta à rede, operação autossuficiente, bombeamento de água). Essa ferramenta permite ao usuário otimizar a maioria dos parâmetros requeridos pela planta fotovoltaica, permitindo também ao usuário utilizar efeitos de sombreamento. O programa conta com um imenso banco de dados referente a componentes modulares dos sistemas fotovoltaicos disponíveis no mercado, como os módulos fotovoltaicos propriamente ditos e inversores para conexão à rede. Além da capacidade de incluir dados novos ao banco já presente, uma avaliação econômica detalhada pode ser gerada para um modelo desenvolvido na ferramenta, facilitando a análise de viabilidade de implantação de uma geração fotovoltaica (KUMAR et al., 2017). O procedimento de simulação do PVSyst consiste nos seguintes passos:

- Inicialmente, um levantamento de recursos pertinentes ao processo deve ser realizado, evidenciando os modelos de módulos fotovoltaicos e inversores de energia, o dimensionamento do local e layout da instalação prevista ou observada, descrição de possíveis construções e demais fontes de sombreamento local e dados de localização geográfica, em latitude e longitude.
- Para evitar conflitos futuros, o próximo passo consiste em conferir a existência dos módulos, inversores e dados geográficos/meteorológicos de interesse no banco de dados já inerente ao programa, adicionando novos dados caso algum elemento não seja encontrado.
- Um projeto deve ser criado no menu de design de projeto do software, definindo se a simulação será de uma usina autossuficiente ou conectada à rede e será requerido o conjunto de dados meteorológicos e geográficos do local em particular para o planejamento do modelo.

- São fornecidos dados apropriados relacionados à planta; isso inclui a distribuição e orientação dos módulos fotovoltaicos, a demarcação da área de instalação da planta, seleção de módulos fotovoltaicos e inversores disponível no banco de dados ou personalizada pelo usuário.
- A simulação pode ser executada, com a possibilidade de serem adicionadas variantes diversas sobre a mesma configuração.

Para este estudo, a versão utilizada do software é a 6.7.0, cuja interface principal é mostrada na Figura 4.1. Essa tela será referenciada como Menu Inicial

Figura 4.1 - Interface principal do software PVSyst 6.7.0 – Menu Inicial.



Fonte: Do autor

4.1 Levantamento de informações necessárias à simulação

Conforme descrito anteriormente, uma série de informações serão necessárias a priori para concluir a simulação completa das usinas solares visitadas. A lista a seguir evidencia os tipos de informações requeridas e a ordem de sua necessidade ao longo da execução da simulação.

- Dados geográficos da localização alvo;
- Dados meteorológicos da localização alvo;
- Orientação da planta solar;
- Diagrama multifilar da planta solar
- Esquemáticos dos elementos elétricos da planta solar;
- Dimensionamento da planta solar;
- Dimensionamento das construções e fontes de sombreamento locais;
- Descrição dos arranjos elétricos entre módulos e inversores.

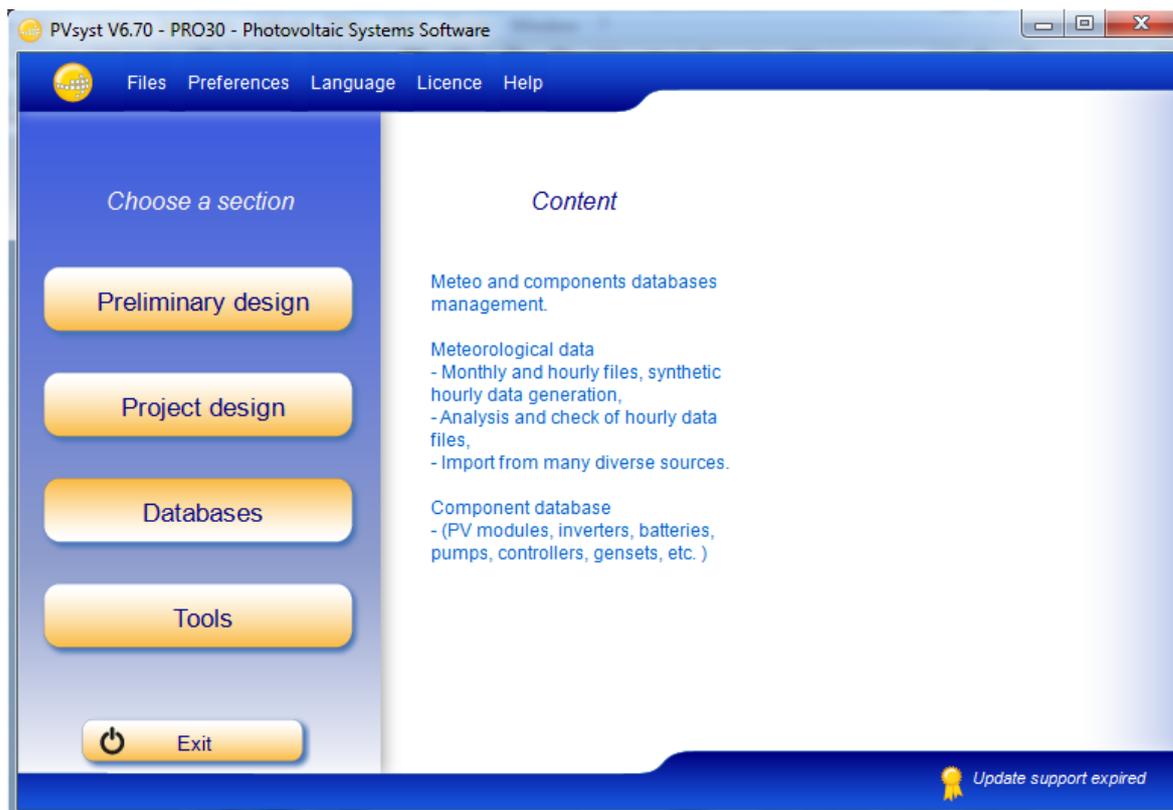
Nem todas as informações necessárias podem ser conseguidas a priori da construção do projeto, sobretudo os dados geográficos e meteorológicos. Contudo, o software possui informações globais suficientes para gerar os dados sinteticamente via valores iniciais de coordenadas geográficas e poucos dados climáticos regionais (que devem ser providenciados via pesquisa para inserção no programa).

Para evitar conflitos de dados já presentes nos bancos de dados inerentes ao software, recomenda-se realizar a etapa descrita na próxima seção antes da criação do projeto, na qual as informações faltantes poderão ser inseridas no programa.

4.2 Adequação do banco de dados do software

Uma vez no Menu Inicial (Figura 4.1), posicionando o mouse sobre a opção *Databases*, é mostrada uma breve explicação do que será realizado (Figura 4.2). Nesse momento, os dados geográficos, meteorológicos, bem como as informações sobre módulos e inversores serão pesquisados no banco de dados do software ou inseridos corretamente nele no caso de sua ausência.

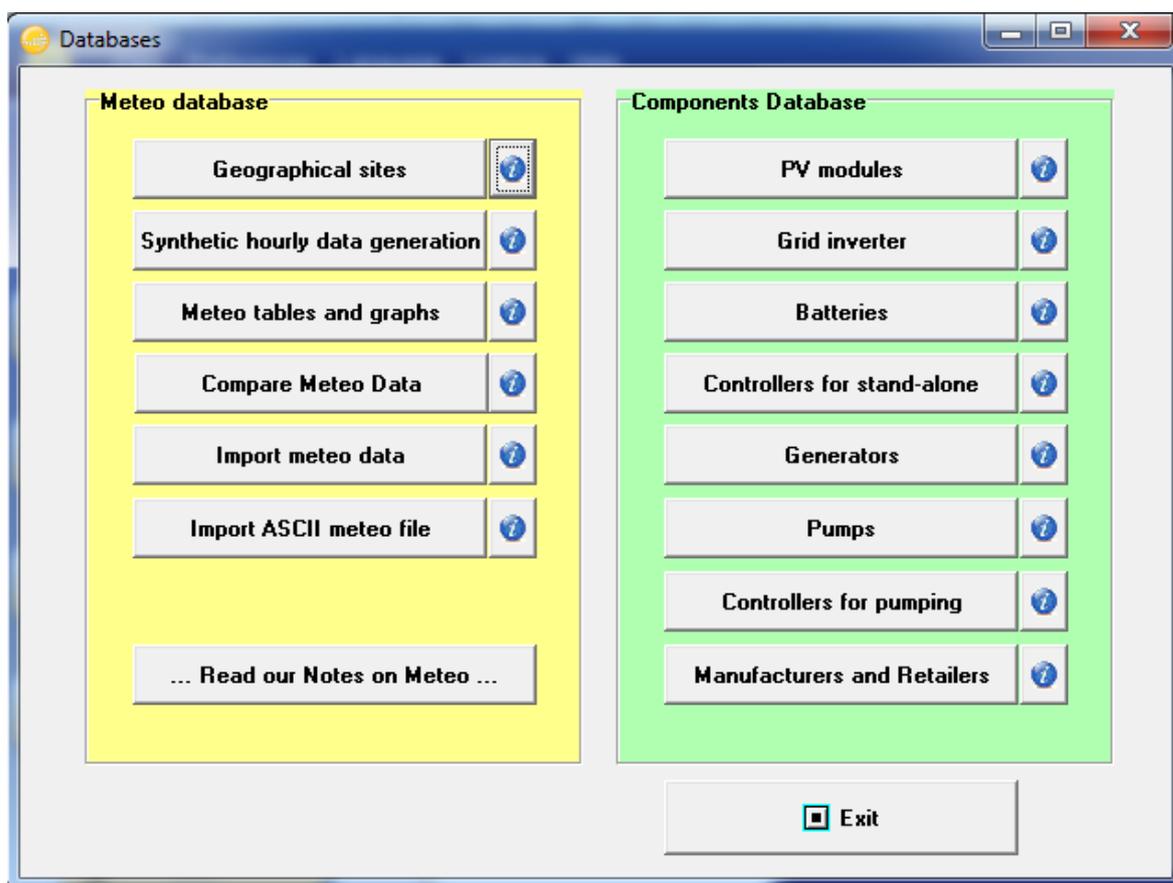
Figura 4.2 - Descrição da opção *Databases* presente no Menu Inicial.



Fonte: Do autor

Escolhida na opção, outra janela é aberta, aqui referenciada como Menu Databases (Figura 4.3). Os próximos passos servirão não somente para garantir que o banco de dados esteja adequado para a conclusão do procedimento de simulação, mas também tem por objetivo adicionar todos os dados relevantes em um subgrupo determinado pelo software como *Favorites* (Favoritos), no qual o usuário pode personalizar o conteúdo, adicionando ou removendo elementos. Essa estratégia agiliza a etapa de construção do projeto e é recomendada nesse estudo.

Figura 4.3 - Opção *Databases* do Menu Inicial - Menu Databases.

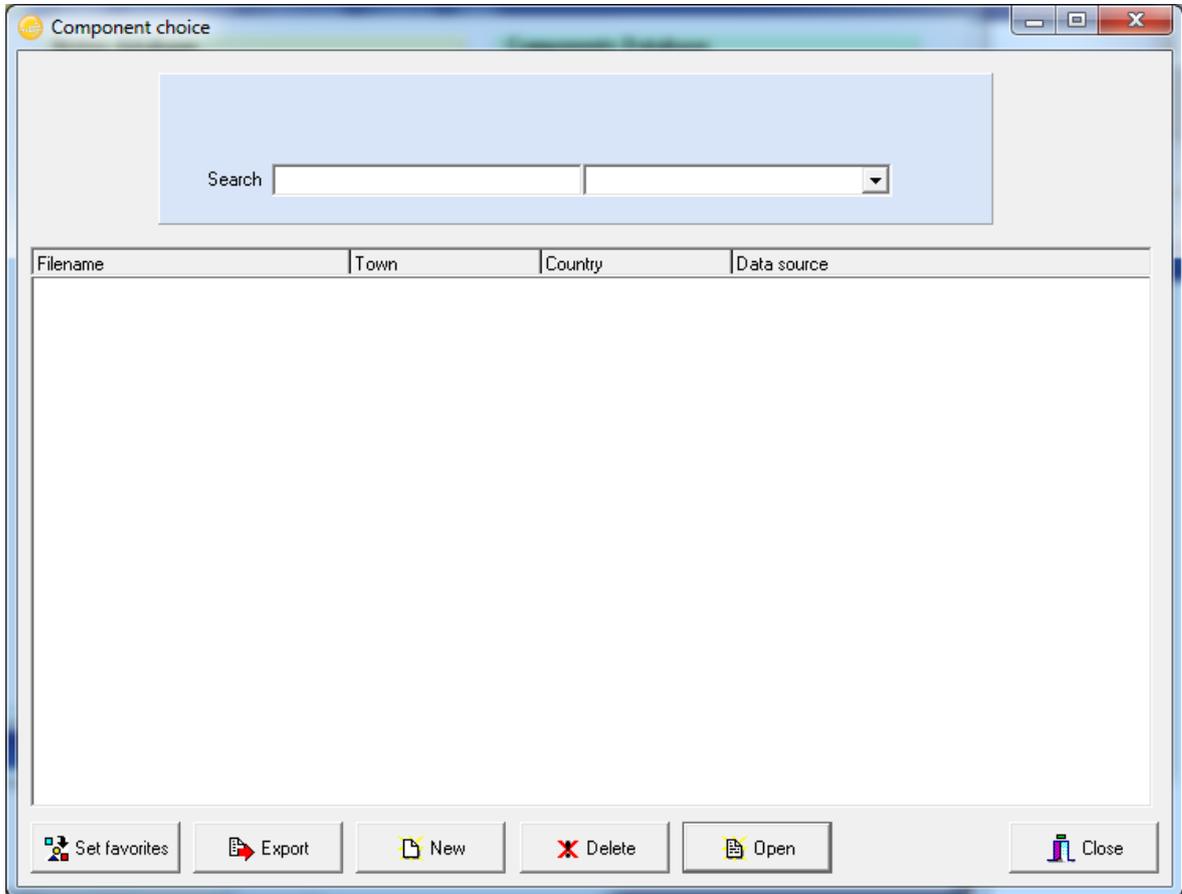


Fonte: Do autor

4.2.1 Dados geográficos e meteorológicos

Clicando no botão *Geographical sites*, abre-se uma janela para pesquisa, como mostrado na Figura 4.4. Clicando no botão *drop-down* presente na segunda lacuna, há opções de filtro para países dos quais o PVSyst contém dados geográficos computados pelo serviço de dados *Meteonorm 7.1*, de propriedade da equipe de desenvolvimento do programa. Caso nenhuma das localidades filtradas para o país escolhido corresponda à região sobre a qual será realizada a simulação, uma nova entrada será feita no banco. Para fins de consideração, a escolha de uma região válida dentre as já existentes pode ser feita para qualquer uma cujos valores inteiros de latitude e longitude sejam iguais à localização alvo da simulação. No caso de uma região válida presente na lista, basta selecionar a mesma na lista mostrada e clicar no botão *Set favorites*. e fechar o Menu Componente Geográfico.

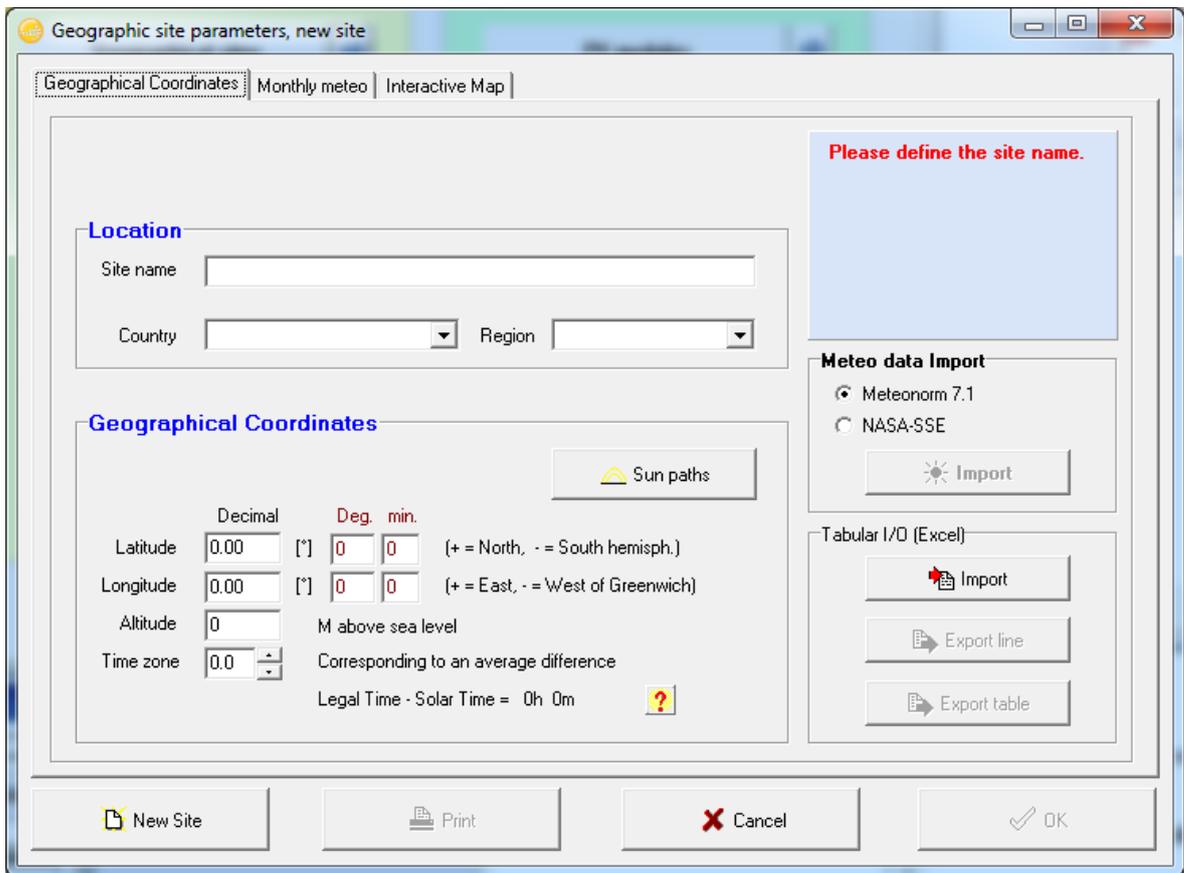
Figura 4.4 - Opção *Geographical sites* do Menu Databases - Menu Componente Geográfico.



Fonte: Do autor

Para adicionar uma localização personalizada, é necessário clicar sobre o botão *New*. A Figura 4.5 mostra a janela para adição do novo local – Menu Novo Local. Na aba *Geographical Coordinates*, uma série de informações é requerida. Como as duas usinas solares presentes nesse trabalho se localizam na mesma região (21° S, 44° W), os valores adicionados nas lacunas do Menu Novo Local estão sumarizados na Tabela 4.1. Feito isso, será necessário estabelecer os dados meteorológicos para essa região, selecionando a opção *NASA-SSE* e, em seguida, no botão *Import*.

Figura 4.5 - Opção New do Menu Componente Geográfico - Menu Novo Local.



Fonte: Do autor

Tabela 4.1 - Valores de preenchimento do Menu Novo Local.

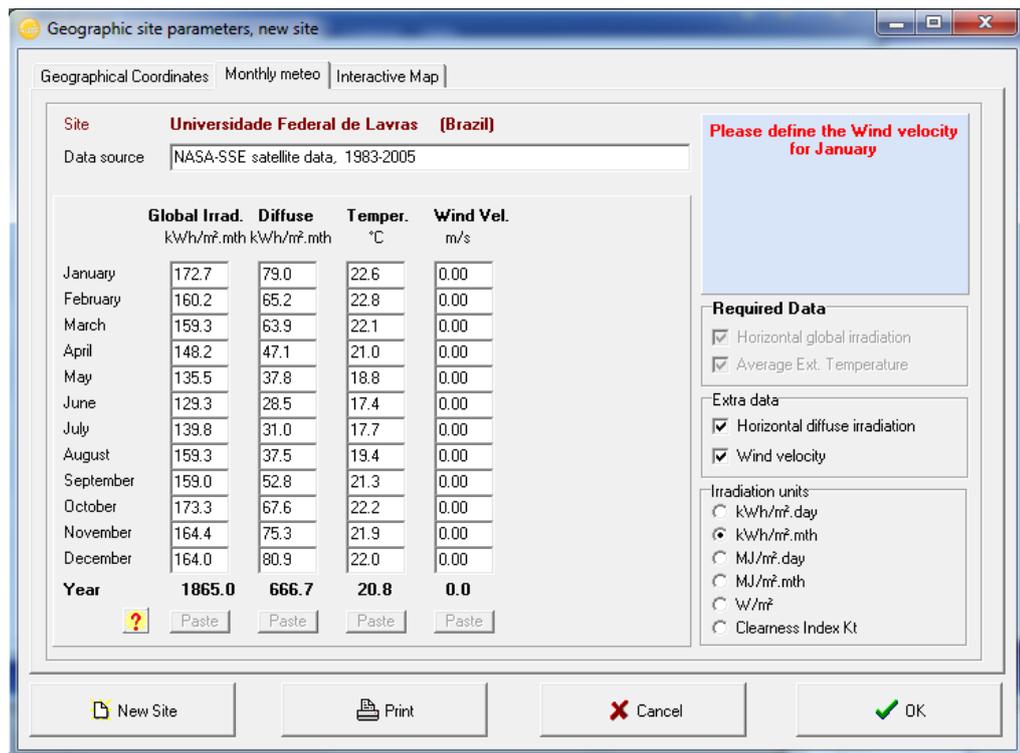
Lacuna	Valor
<i>Site name</i>	Universidade Federal de Lavras
<i>Country</i>	Brazil
<i>Region</i>	South Amnerica
<i>Latitude (Decimal)</i>	-21
<i>Longitude (Decimal)</i>	-44
<i>Altitude</i>	919
<i>Time zone</i>	-3.0

Fonte: Do autor

Confirmando as opções que surgirem, a aba do Menu Novo Local muda automaticamente para *Monthly meteo*, com os valores referentes ao local personalizado, como mostrado na Figura 4.6. Dados referentes ao comportamento dos ventos ao longo dos meses são necessários nessa etapa, cabendo ao usuário suprir tal informação via pesquisa. Para o local de estudo, a Tabela 4.2 mostra os valores médios de velocidade dos ventos ao

longo do ano (INMET, 2019). Clicando no botão *OK*, uma tela de salvamento do arquivo é aberta para registrar o novo local no banco de dados. A janela retorna para o Menu Componente Geográfico, apresentando a nova localidade na lista. Feito isso, basta selecionar a mesma na lista mostrada e clicar no botão *Set favorites*. e fechar o Menu Componente Geográfico.

Figura 4.6 – Segunda aba do Menu Novo Local.



Fonte: Do autor

Tabela 4.2 - Valores de preenchimento da segunda aba do Menu Novo Local.

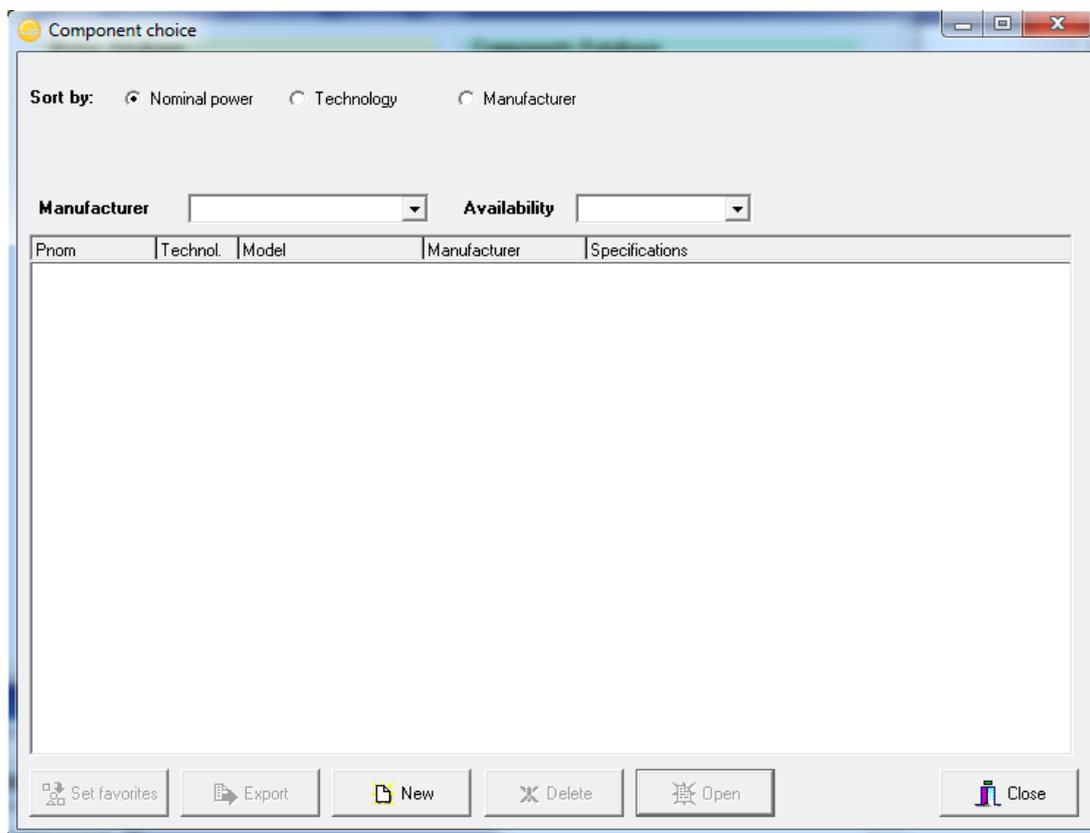
Lacuna	Velocidade do Vento (m/s)
<i>January</i>	2.00
<i>February</i>	2.00
<i>March</i>	3.08
<i>April</i>	3.09
<i>May</i>	3.13
<i>June</i>	3.07
<i>July</i>	2.90
<i>August</i>	2.40
<i>September</i>	2.33
<i>October</i>	2.13
<i>November</i>	2.00
<i>December</i>	1.90

Fonte: Do autor

4.2.2 Módulos fotovoltaicos e inversores

Clicando no botão *PV modules*, abre-se uma tela de pesquisa surge semelhante ao passo anterior, mostrada na Figura 4.7. Clicando no botão *drop-down* presente na primeira lacuna, há opções de filtro para fabricantes de módulos fotovoltaicos sobre os quais o PVSyst mantém especificações técnicas e parâmetros dentro dos padrões profissionais recomendados. Encontrada a empresa, a lista de modelos é mostrada, sendo possível escolher aqueles a serem utilizados na simulação, bastando selecionar a empresa na lista mostrada, selecionar o modelo do painel desejado, clicar no botão *Set favorites* e fechar o Menu Componente Módulo. Em caso de falta da empresa ou do modelo, será necessário inserir uma nova entrada no banco de dados, de forma semelhante à feita anteriormente – munido das especificações técnicas e do passo a passo fornecido pelo programa. No presente relatório, os módulos necessários se encontram no banco de dados sob as especificações listadas na Tabela 4.3.

Figura 4.7 - Opção *PV modules* do Menu Databases - Menu Componente Módulo.



Fonte: Do autor

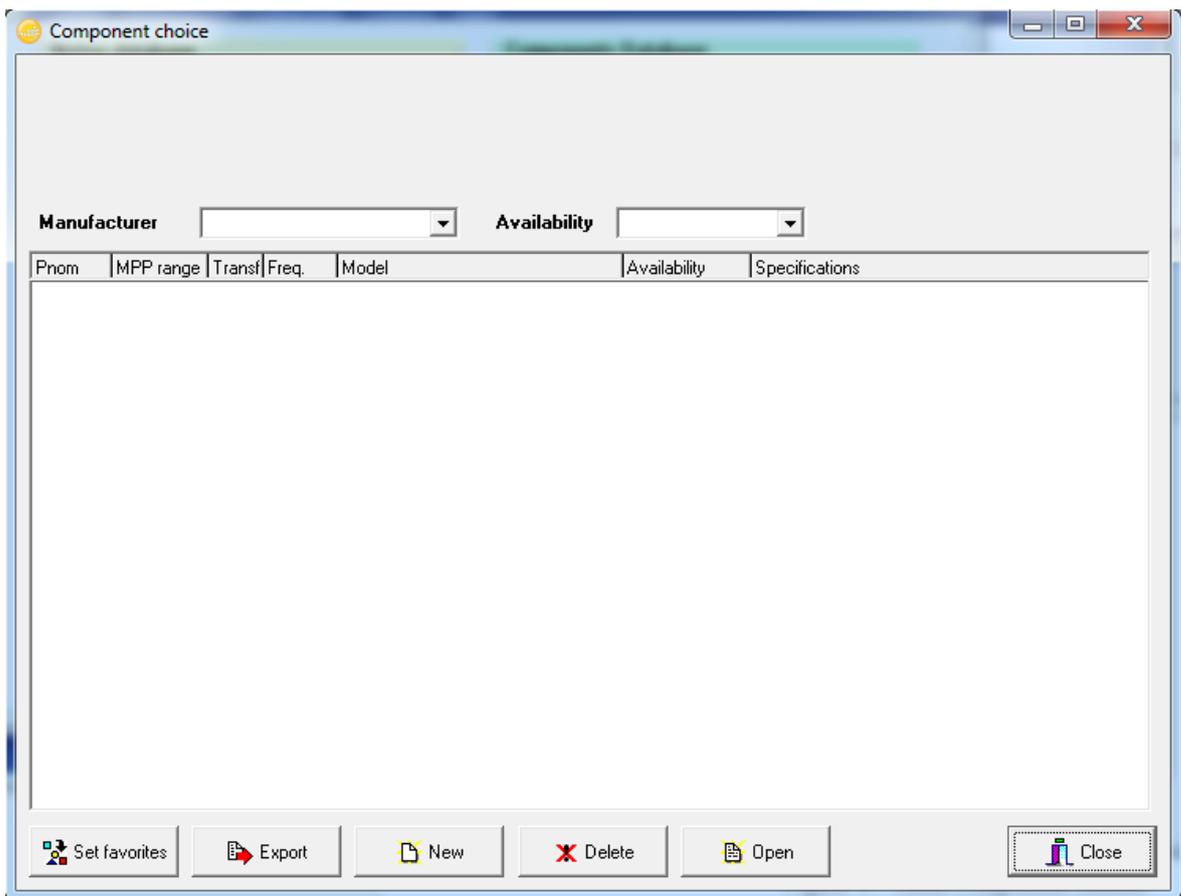
Tabela 4.3 - Valores de preenchimento do Menu Componente Módulo.

Informação	Módulo	
	Tipo 1	Tipo 2
<i>Manufacturer</i>	Kyocera	Jinko Solar
<i>Model</i>	KC50T	JKM 330PP-72-V
<i>Pnom</i>	54 W	330 W

Fonte: Do autor

O procedimento segue as mesmas etapas para os inversores. Clicando no botão *Grid inverter*, abre-se uma tela de pesquisa, mostrada na Figura 4.8. No presente relatório, os inversores necessários se encontram no banco de dados sob as especificações listadas na Tabela 4.4.

Figura 4.8 - Opção Grid inverter do Menu Databases - Menu Componente Inversor.



Fonte: Do autor

Tabela 4.4 - Valores de preenchimento do Menu Componente Inversor.

Informação	Inversor		
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
<i>Manufacturer</i>	Fronius	Fronius	PHB Eletrônica
<i>Model</i>	Primo 5.0-1	Primo 4.0-1	PHB5000-D-NS
<i>Pnom</i>	5 kWp	4 kWp	5 kWp

Fonte: Do autor

4.3 Criação de um projeto conectado à rede

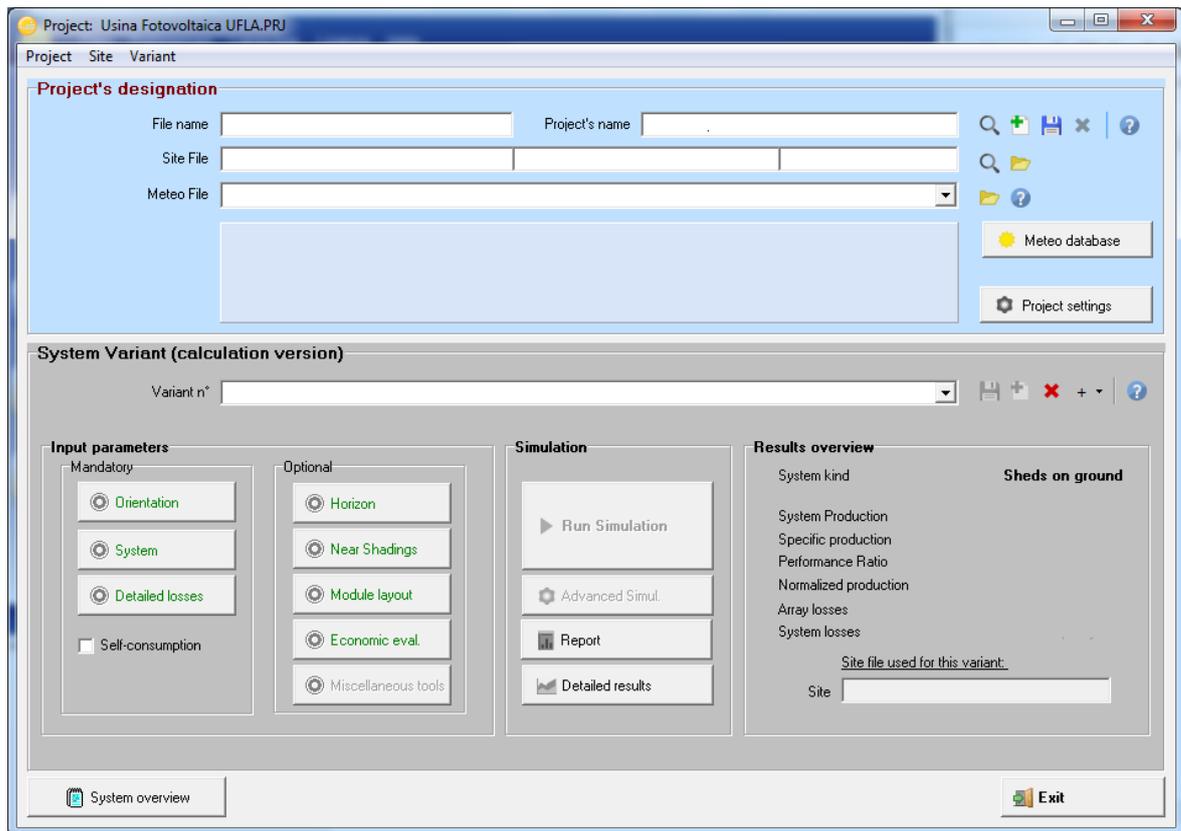
Uma vez preenchido o banco de dados, e fechadas todas as janelas extras abertas, o projeto principal pode ser criado no Menu Inicial, clicando sobre *Project Design*, que comporta um submenu de opções, dentre as quais será escolhida a *Grid-Connected* (conectado à rede). A Figura 4.9 mostra essa escolha e a janela aberta em decorrência da escolha é mostrada na Figura 4.10.

Figura 4.9 - Descrição da opção *Project Design* presente no Menu Inicial.



Fonte: Do autor

Figura 4.10 - Opção *Grid-Connected* do Menu Inicial - Menu Novo Projeto.



Fonte: Do autor

A criação do novo projeto requer a escolha de um nome para o arquivo (lacuna *File name*), um nome para o projeto (lacuna *Project's name*) e a escolha dos dados geográficos e meteorológicos do local alvo. Para tanto, basta clicar no símbolo da pasta (📁) à direita das lacunas *Site File*. A janela do Menu Componente Geográfico (Figura 4.4) será aberta, bastando clicar no botão *drop-down* presente na segunda lacuna para escolher o filtro *Favorites*, que listará os dados geográficos já conferidos anteriormente. Selecionando-os e confirmando, o projeto será preenchido automaticamente tanto com os dados geográficos quanto meteorológicos e estará pronto para ser salvo e customizado.

Para o presente estudo, dois projetos foram criados separadamente para cada uma das plantas solares visitadas.

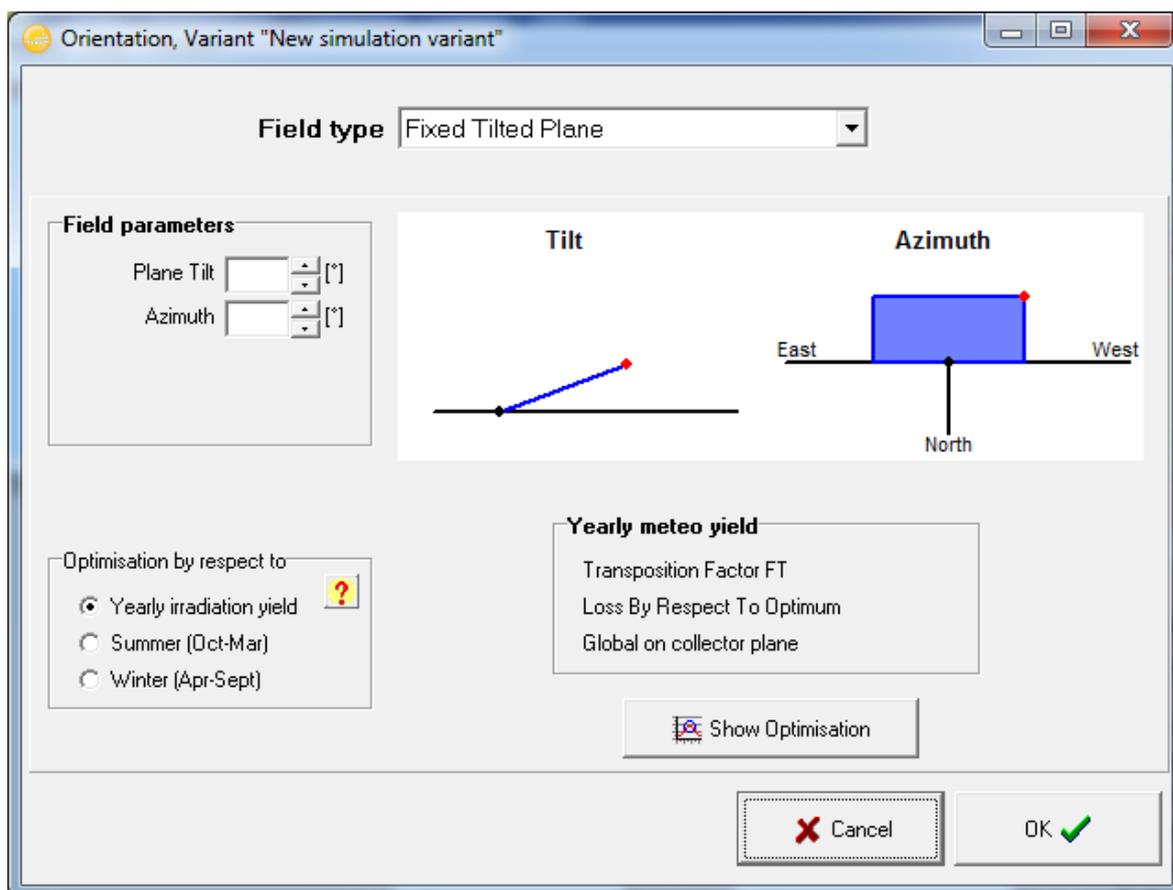
4.4 Customização do sistema a ser simulado

Nesta seção, as customizações na ordem de importância serão descritas por etapas e os valores das lacunas relevantes serão tabelados para os respectivos projetos desenvolvidos.

4.4.1 Orientação

Clicando no botão *Orientation*, a janela da Figura 4.11 será aberta. Aqui, são definidos a inclinação com relação ao solo (*Plane tilt*) e o azimute (*Azimuth*). A Tabela 4.5 sumariza os valores para os projetos deste relatório. Uma vez inseridos, basta confirmar no botão *OK*.

Figura 4.11 - Opção *Orientation* do Menu Novo Projeto - Menu Orientação.



Fonte: Do autor

Tabela 4.5 - Valores de preenchimento do Menu Orientação.

Informação	Projeto	
	UFLA	ADUFLA
<i>Plane tilt</i>	43°	21°
<i>Azimuth</i>	0°	0°

Fonte: Do autor

4.4.2 Sistema

Clicando no botão *System*, a janela da Figura 4.12 será aberta.

Figura 4.12 - Opção *System* do Menu Novo Projeto - Menu Sistema.

Fonte: Do autor

Aqui, são definidos diversos parâmetros sobre a instalação elétrica da planta solar, sendo tal definição feita na seguinte ordem:

- Determinação do número de submalhas de uma mesma planta e escolha de um nome para cada uma;
- Escolha dos módulos fotovoltaicos presentes em cada submalha – o processo é semelhante ao realizado para determinar os dados geográficos, filtrando por *Favorites*;
- Escolha dos inversores presentes em cada submalha – o processo é semelhante ao realizado para determinar os módulos fotovoltaicos, filtrando por *Favorites*;
- Definição do número de entradas MPPT do inversor;
- Definição do número de painéis solares conectados e sua configuração em série e paralelo (*Mod. in series* e *Nbre strings*).

Há 3 submalhas para cada um dos projetos feitos nesse estudo, sendo os valores a serem definidos tabelados a nas Tabelas 4.6 e 4.7. Uma vez preenchidos os valores, basta confirmar e preparar o modelo tridimensional do projeto, conforme descreve a próxima seção.

Tabela 4.6 - Valores de preenchimento do Menu Sistema para a usina fotovoltaica UFLA.

Informação	Nome da submalha		
	Inversor 1	Inversor 2	Inversor 3
<i>PV Module</i>	KC50T	KC50T	KC50T
<i>Inverter</i>	Primo 5.0-1	Primo 5.0-1	Primo 4.0-1
<i>MPPTs</i>	2	2	2
<i>Mod. in series</i>	23	23	22
<i>Nbre strings</i>	4	4	3

Fonte: Do autor

Tabela 4.7 - Valores de preenchimento do Menu Sistema para a usina fotovoltaica ADUFLA.

Informação	Submalha		
	Inversor 1	Inversor 2	Inversor 3
<i>PV Module</i>	JKM 330PP-72-V	JKM 330PP-72-V	JKM 330PP-72-V
<i>Inverter</i>	PHB5000-D-NS	PHB5000-D-NS	PHB5000-D-NS
<i>MPPTs</i>	2	2	2
<i>Mod. in series</i>	8	9	8
<i>Nbre strings</i>	2	2	2

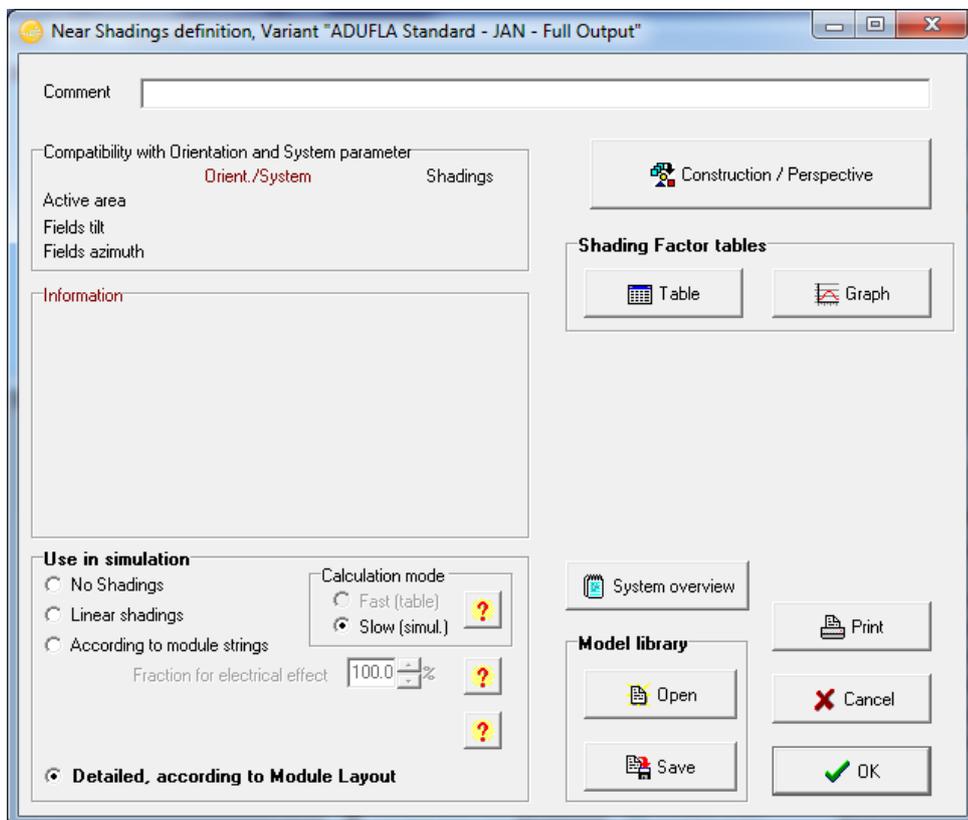
Fonte: Do autor

4.4.3 Modelo tridimensional

O PVSyst permite criar um modelo tridimensional da planta solar simulada de forma a adicionar todas as informações até o momento cedidas para gerar projeções de sombreamento e dispor corretamente os módulos solares no plano de incidência solar. O nível de detalhes dessa seção excede as intenções do presente estudo, mas vale ressaltar que o software possui tutoriais completos em seu manual presente na pasta de instalação do mesmo. Assim, os modelos apenas serão mostrados, de forma a reproduzir o cenário das usinas solares visitadas e cujas dimensões foram coletadas de antemão.

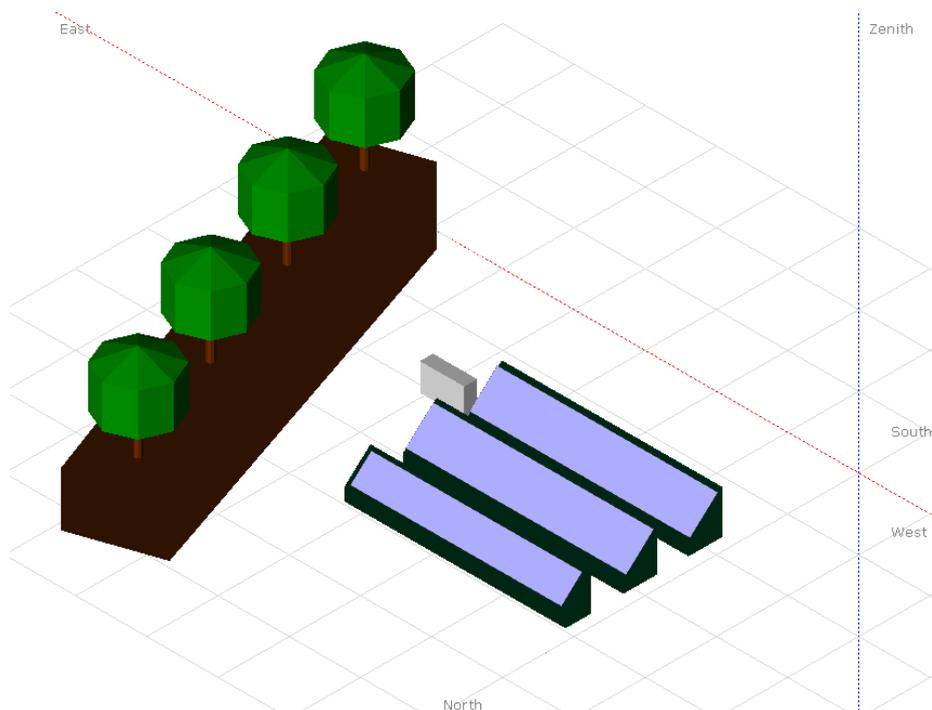
Clicando no botão *Near Shadings*, a janela da Figura 4.13 será aberta. O botão *Construction / Perspective* abre a interface de edição do ambiente, que não será explorada nessa etapa, mas os modelos finais usados nas simulações são mostrados pelas Figuras 4.14 e 4.15. Uma vez criados os modelos, basta confirmar para levar o projeto ao estado final da preparação, sendo possível realizar a simulação, conforme descreve a próxima seção.

Figura 4.13 - Opção *Near Shadings* do Menu Novo Projeto - Menu Modelo.



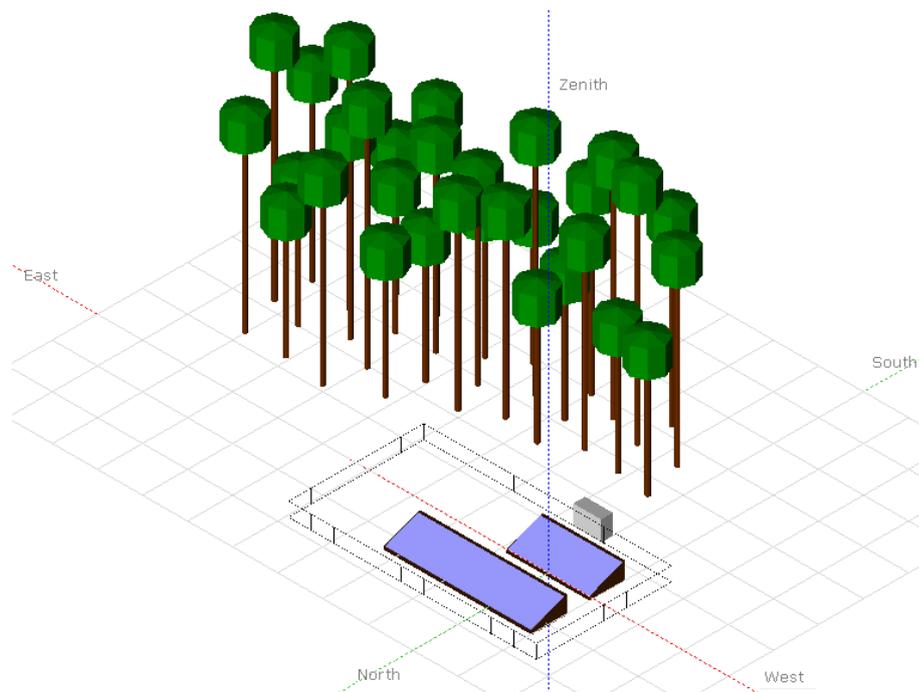
Fonte: Do autor

Figura 4.14 - Modelo tridimensional da usina fotovoltaica UFLA.



Fonte: Do autor

Figura 4.15 - Modelo tridimensional da usina fotovoltaica ADUFLA.

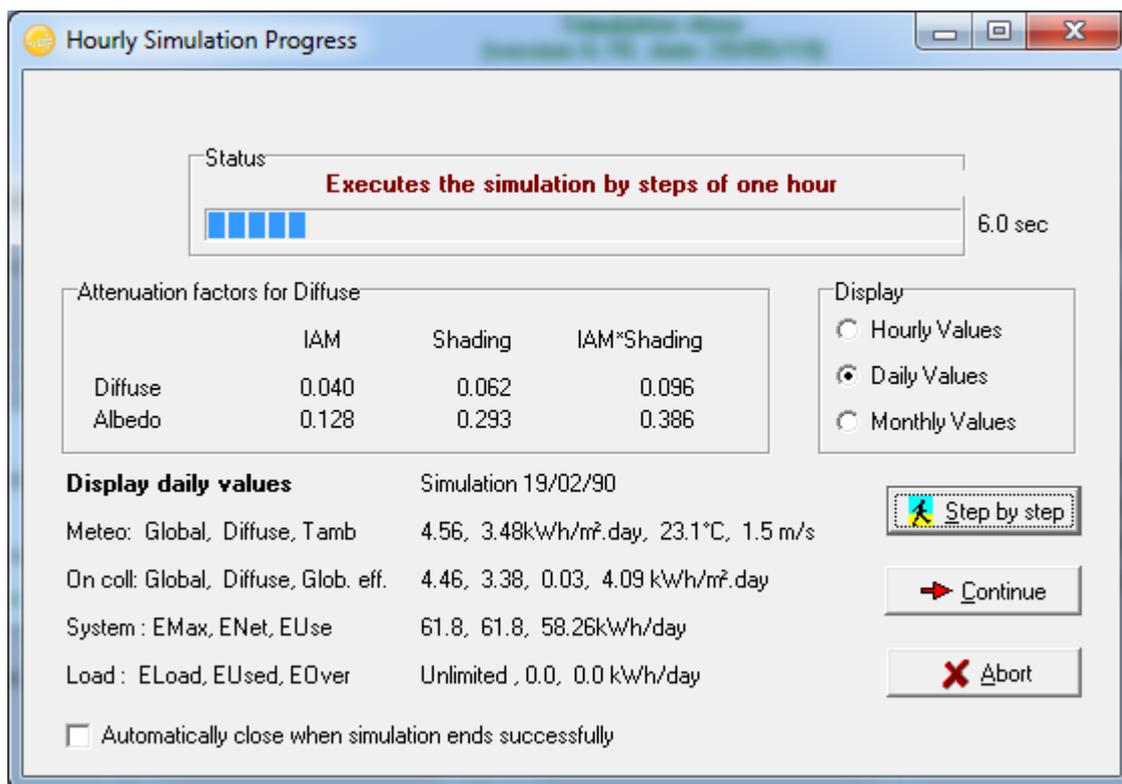


Fonte: Do autor

4.5 Realização da simulação

Clicando no botão *Run Simulation*, a janela da Figura 4.16 será aberta.

Figura 4.16 - Opção Run Simulation do Menu Novo Projeto - Menu Simulação (em execução).



Fonte: Do autor

Este processo gera dados sintéticos para o comportamento climático ao longo de um ano inteiro, traça um perfil do posicionamento solar no céu a cada dia, utiliza séries numéricas para extrapolar dados diários baseando-se nas informações mensais meteorológicas e calcula perdas de irradiação pelo sombreamento levando em conta o modelo tridimensional. A produção de energia provém das características intrínsecas aos elementos elétricos tabelados e seu comportamento técnico descrito no banco de dados ou inserido pelo usuário. Após a conclusão da simulação, basta confirmar o botão *OK* para salvar os dados e verificar os resultados do procedimento. A maneira mais simplificada de verificação do resultado é a geração de um relatório pelo próprio programa, clicando no botão *Report*. O conteúdo desse documento é revelado e discutido no próximo capítulo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da simulação dos sistemas fotovoltaicos visitados são analisados nesta sessão. Os resultados foram obtidos a partir dos modelos de simulação em ambiente PVSyst para a usina fotovoltaica UFLA (14 kWp) e para a usina fotovoltaica ADUFLA (15 kWp), levando em consideração as especificações e restrições de seus projetos reais. A seguir, são apresentados os pareceres descritos no relatório final do PVSyst.

5.1 Resultados principais

A partir dos principais resultados da simulação, três parâmetros principais foram listados. O primeiro parâmetro é a quantidade total de energia produzida a partir de cada sistema fotovoltaico em base anual, que é referida como energia produzida, em unidades de MWh/ano. O segundo parâmetro é a produção específica em base anual por kWp instalado, dado em kWh/kWp/ano. O terceiro parâmetro é o índice de desempenho médio anual (*PR*), expresso em %.

Resultados principais para a usina fotovoltaica UFLA:

- 18,25 MWh/ano
- 1352 kWh/kWp/ano
- 71,56%

Resultados principais para a usina fotovoltaica ADUFLA:

- 25,50 MWh/ano
- 1546 kWh/kWp/ano
- 78,92%

5.2 Balanço de desempenhos

O balanço e os principais resultados mostrados nos Quadros 5.1 e 5.2 (respectivamente, tratando da usina fotovoltaica UFLA e da usina fotovoltaica ADUFLA) incluem em ordem as variáveis: irradiância global no plano horizontal, temperatura média do ambiente, irradiância global do plano coletor sem correção óptica e irradiância global efetiva considerando as perdas por sujeira e por sombreamento. Além dessas variáveis, a energia

DC produzida pelos arranjos fotovoltaicos, o montante energético injetado à rede por cada uma considerando suas perdas, bem como o rendimento dos sistemas também são computados. Os valores calculados de cada variável mencionada nos balanços são dados com base mensal e anual.

Quadro 5.2 - Balanços e principais resultados da usina fotovoltaica UFLA (14 kWp).

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	170.8	79.70	22.39	128.9	111.8	1.288	1.231	0.708
February	156.5	65.50	22.54	131.2	115.2	1.310	1.256	0.709
March	156.2	63.90	21.79	154.0	136.5	1.538	1.476	0.710
April	142.8	47.10	20.48	167.7	151.2	1.708	1.645	0.727
May	128.3	38.40	18.18	176.3	157.2	1.778	1.714	0.720
June	122.7	29.40	17.00	185.0	163.3	1.855	1.792	0.717
July	132.7	31.90	17.07	191.8	170.2	1.914	1.847	0.713
August	154.1	37.80	18.69	196.9	178.7	2.000	1.929	0.726
September	150.9	53.70	20.19	157.7	140.8	1.578	1.517	0.712
October	169.3	68.20	21.13	149.9	131.6	1.501	1.440	0.712
November	165.0	75.60	21.22	128.7	112.2	1.299	1.243	0.715
December	164.6	81.80	21.68	120.7	104.2	1.210	1.156	0.709
Year	1813.9	673.00	20.18	1888.8	1673.0	18.980	18.246	0.716

Fonte: Do autor

Quadro 5.1 - Balanços e principais resultados da usina fotovoltaica ADUFLA (15 kWp).

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	170.8	79.70	22.39	158.0	144.9	2.091	1.956	0.750
February	156.5	65.50	22.54	152.1	142.2	2.056	1.931	0.769
March	156.2	63.90	21.79	164.1	155.4	2.257	2.124	0.785
April	142.8	47.10	20.48	164.4	157.0	2.307	2.191	0.808
May	128.3	38.40	18.18	161.3	154.2	2.270	2.155	0.810
June	122.7	29.40	17.00	163.0	156.0	2.309	2.200	0.818
July	132.7	31.90	17.07	171.9	164.9	2.420	2.299	0.811
August	154.1	37.80	18.69	186.1	179.0	2.622	2.496	0.813
September	150.9	53.70	20.19	163.3	155.6	2.261	2.135	0.792
October	169.3	68.20	21.13	168.8	159.1	2.316	2.183	0.784
November	165.0	75.60	21.22	155.0	143.4	2.095	1.966	0.769
December	164.6	81.80	21.68	150.3	137.1	1.998	1.865	0.752
Year	1813.9	673.00	20.18	1958.5	1848.7	27.001	25.503	0.789

Fonte: Do autor

Para a usina fotovoltaica UFLA, a irradiância global anual no plano horizontal é de 1813,9 kWh/m², a energia incidente global em base anual no coletor sem correções ópticas

e irradiação global eficaz após perdas ópticas somam 1888,8 kWh/m² e 1673,0 kWh/m², respectivamente. O rendimento médio anual da matriz fotovoltaica observada é de 18,98 MWh e, similarmente, o rendimento do sistema é avaliada em 18,25 MWh.

Para a usina fotovoltaica ADUFLA, a análise equivalente fornece: irradiância global anual no plano horizontal: 1813,9 kWh/m², a energia incidente: 1958,5 kWh/m², irradiação global eficaz: 1848,7 kWh/m², rendimento da matriz fotovoltaica: 27,00 MWh, e rendimento do sistema: 25,50 MWh.

5.3 Produção normalizada

Produções normalizadas relativas a perdas de captura da matriz, perdas do sistema e energia útil produzida por kWp instalado por dia (rendimento final do sistema) foram avaliadas a partir das simulações, como assim consta nas Figuras 5.1 e 5.2. Essas produções normalizadas são definidas pelas normas IEC, constituindo variáveis padronizadas para avaliar o desempenho do sistema fotovoltaico – discutidas entre os parâmetros do sistema anteriormente.

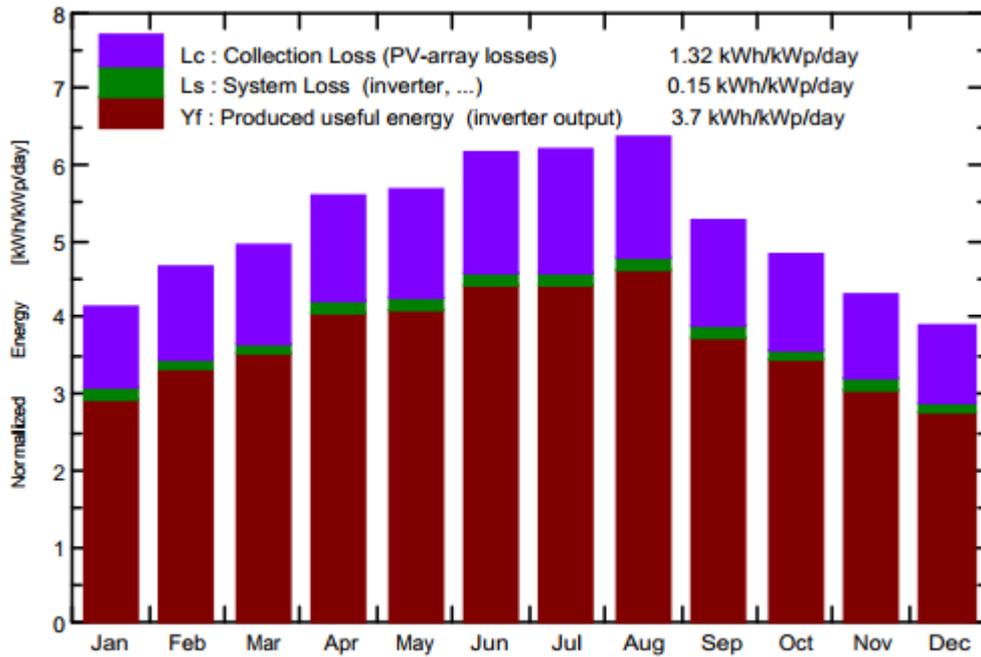
Produção verificada na usina fotovoltaica UFLA:

- Perdas de captura da matriz (L_C): 1,32 kWh/kWp/dia
- Perdas do sistema (L_S): 0,15 kWh/kWp/dia
- Rendimento final do sistema (Y_f): 3,7 kWh/kWp/dia

Produção verificada na usina fotovoltaica ADUFLA:

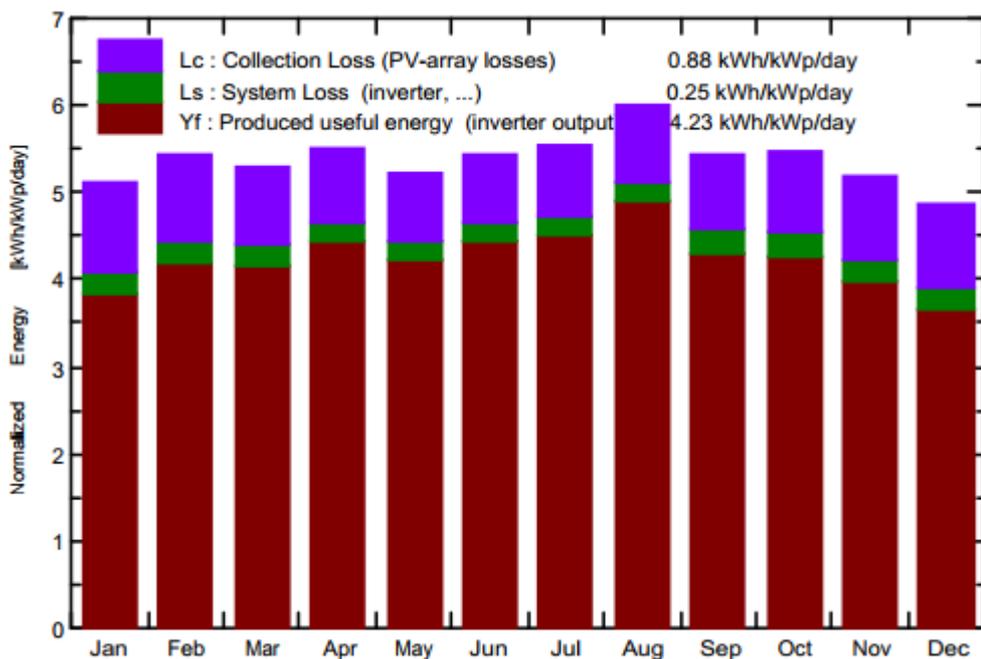
- Perdas de captura da matriz (L_C): 0,88 kWh/kWp/dia
- Perdas do sistema (L_S): 0,25 kWh/kWp/dia
- Rendimento final do sistema (Y_f): 4,23 kWh/kWp/dia

Figura 5.1 - Produção de energia elétrica por kWp instalado na usina fotovoltaica UFLA.



Fonte: Do autor

Figura 5.2 - Produção de energia elétrica por kWp instalado na usina fotovoltaica ADUFLA.

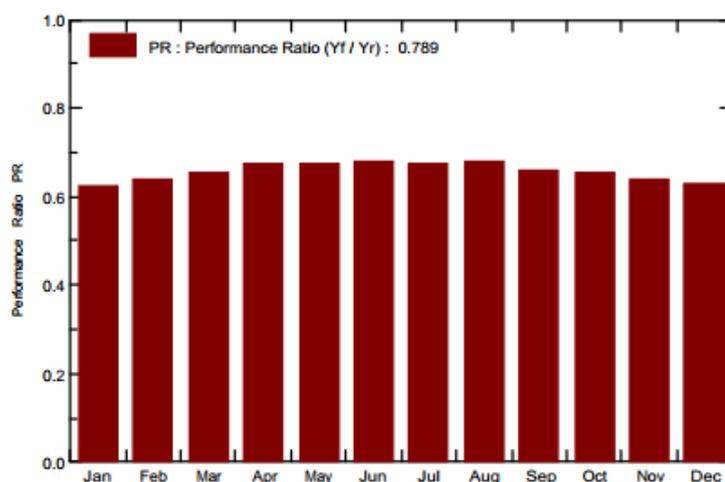


Fonte: Do autor

5.4 Índice de desempenho

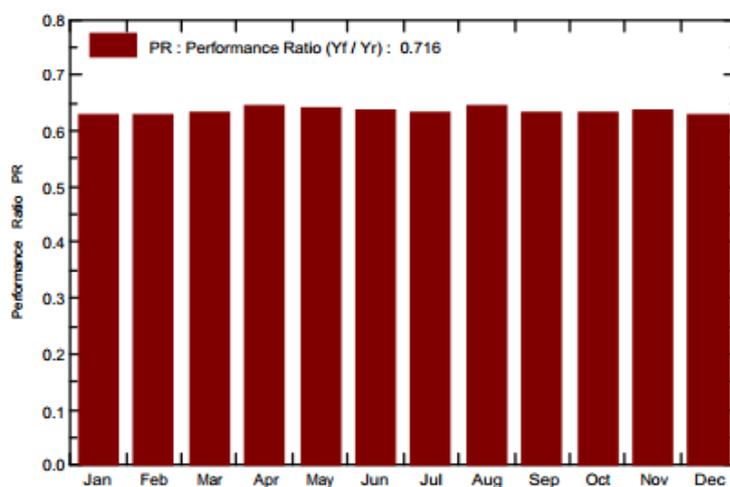
O índice de desempenho (*PR*) dos sistemas simulados é apresentado mensalmente e com média anual. Para a usina fotovoltaica UFLA, tem-se média anual 71,6%, sendo o mês mais eficiente Abril, com 72,7% e o menos eficiente Janeiro, com 70,8%. De forma semelhante, para a usina fotovoltaica ADUFLA, o índice de desempenho varia entre 81,8% em Junho e 75,0% em Janeiro, com média anual de 78,9%. As Figuras 5.3 e 5.4 trazem os dados descritos na íntegra.

Figura 5.3 - Índice de desempenho da usina fotovoltaica UFLA.



Fonte: Do autor

Figura 5.4 - Índice de desempenho da usina fotovoltaica ADUFLA.

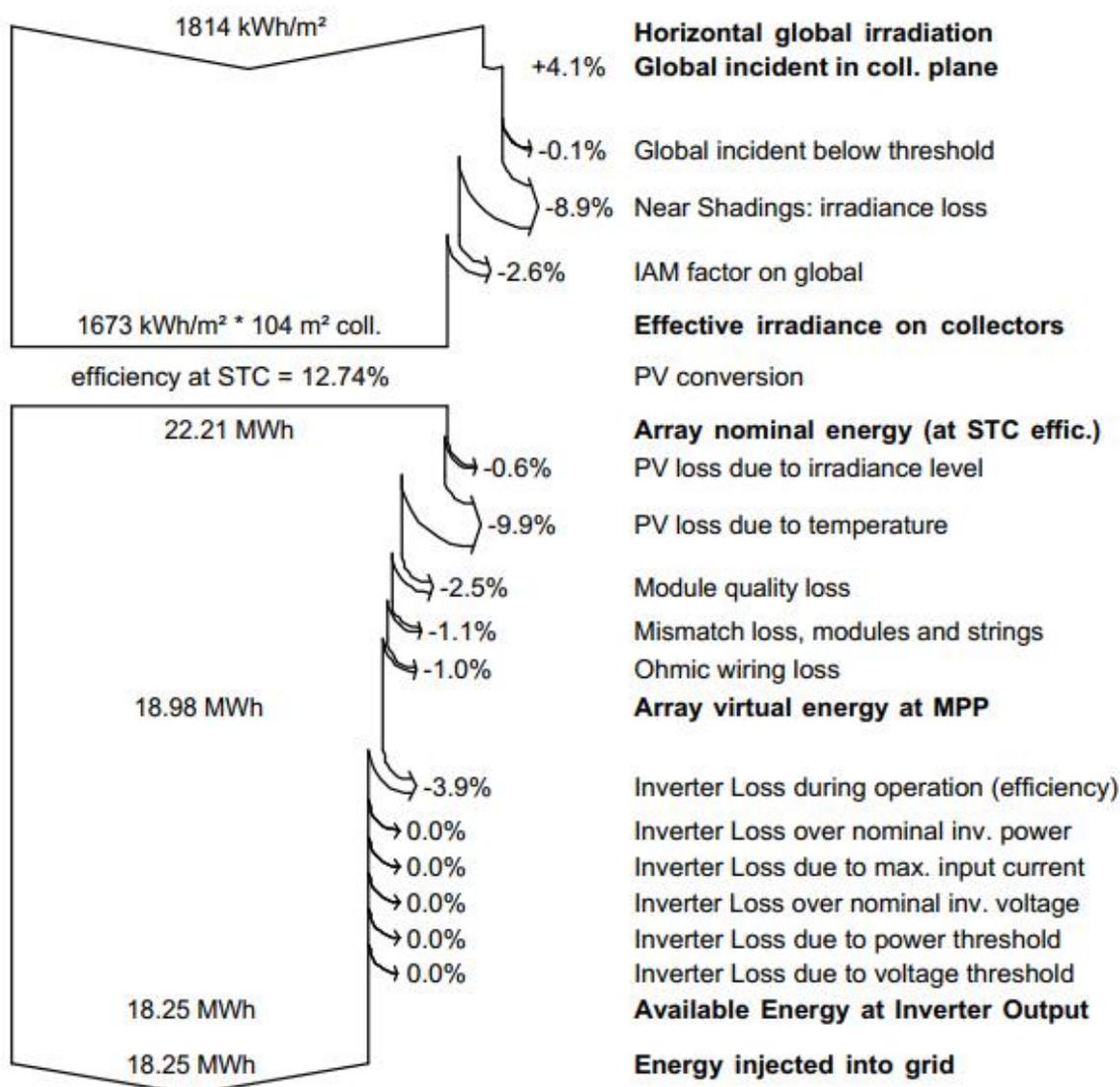


Fonte: Do autor

5.5 Diagrama de perdas

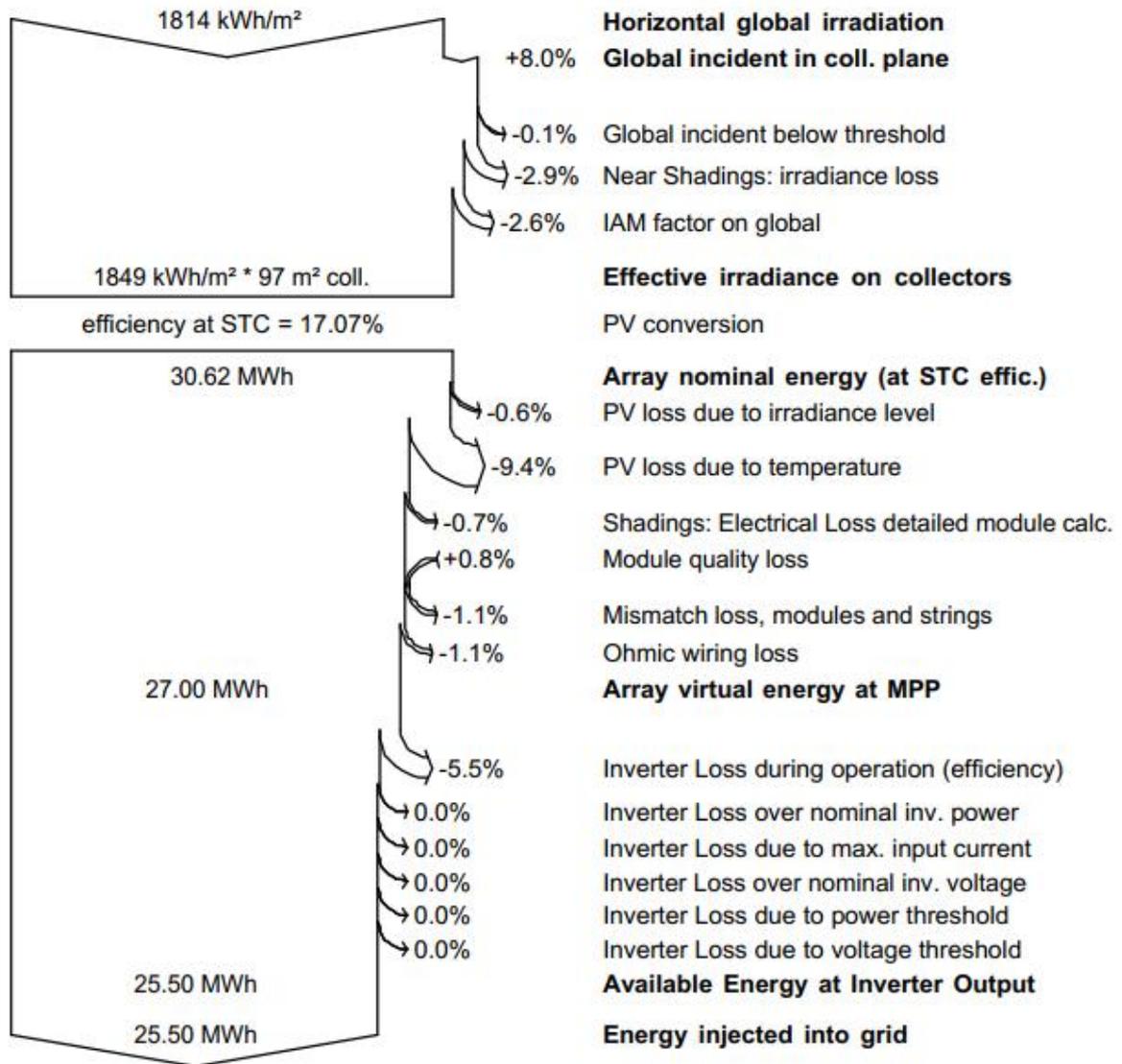
O diagrama de perdas é o último balanço fornecido pelo PVSyst na análise da simulação, ajudando na compreensão das diversas fontes de perdas que devem ser encontradas durante a instalação dos sistemas fotovoltaicos ou restrições a serem consideradas. Para este estudo, as Figuras 5.5 e 5.6 trazem o diagrama de perdas para cada uma das usinas simuladas.

Figura 5.5 – Diagrama anual de perdas sobre a usina fotovoltaica UFLA.



Fonte: Do autor

Figura 5.6 - Diagrama anual de perdas sobre a usina fotovoltaica ADUFLA.



Fonte: Do autor

A usina fotovoltaica UFLA recebe irradiação global horizontal num total de 1814 kWh/m², mas o coletor dos módulos solares retém irradiação efetiva no valor de 1673 kWh/m². Essa quantia provém de uma perda de 8,9% devido ao nível de sombreamento causado pelas proximidades. Assim que a luminosidade incide sobre a célula solar, o efeito fotoelétrico entra em atividade, gerando para esta usina uma conversão de 22,21 MWh/ano no STC, com seus módulos em nível de eficiência de 12,74%. Perdas relativas ao painel fotovoltaico se concentram como:

- 9,9% devido à temperatura;
- 3,1% por degradação induzida pela luz e qualidade do módulo;

- 1,1% por incompatibilidade do layout da matriz com a coleta da energia via efeito fotoelétrico; e
- 1,0% por uma corrente residual inerente ao material do módulo.

Após as perdas relativas ao módulo, a energia elétrica retida atinge 18,98 MWh/ano. Em seguida, a quantia é repassada aos inversores e sofre os efeitos da sua participação no sistema; tais efeitos provocam perdas por operação de conversão da corrente contínua para corrente alternada (em 3,9%) e nenhuma perda devido à submissão do equipamento a condições limitantes (corrente máxima, temperatura limite, etc.). Em suma, é injetado à rede o montante energético anual conferido nas seções anteriores (18,25 MWh/ano).

A usina fotovoltaica ADUFLA, com um sombreamento menos incidente ao longo do ano, tem irradiação global horizontal em 1814 kWh/m², com a irradiação no plano do coletor elevada a 1849 kWh/m². Com eficiência dos módulos em 17,07% e um montante de 30,62 MWh/ano no STC, as perdas decorrentes dos módulos são

- 9.4% devido à temperatura;
- 0.5% por degradação induzida pela luz e qualidade do módulo;
- 1.1% por incompatibilidade do layout; e
- 1.1% pela corrente residual.

O inversor de energia recebe 27 MWh/ano, total reduzido pelas perdas de operação de conversão da corrente contínua para corrente alternada (em 5,5%) e também nulas quanto à submissão do equipamento a condições limitantes. Por fim, são aderidos à rede 25,50 MWh anualmente.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um procedimento de avaliação de viabilidade e eficiência para sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Dois sistemas, um de 14 kWp e outro de 15 kWp, foram simulados no software PVSyst com base em instalações reais e suas características localizacionais e especificação de seus componentes. Uma vez inseridos os dados corretos, uma grande gama de simulações e projeções podem ser feitas, bem como comparações mensais, semanais e diárias com dados reais, mostrando que o software cumpre o objetivo de previsão de viabilidade da instalação solar e apresenta os resultados de forma clara e de fácil manipulação para demais configurações do sistema.

A partir da análise dos resultados das simulações, pode-se concluir que, apesar da proximidade de suas potências nominais e localizações geográficas, cada planta lida com perdas de naturezas diferentes com mais de 7 pontos percentuais de diferença em desempenho (71,56% e 78,92%), mesmo recebendo a mesma incidência luminosa (1814 kWh/m² foram convertidos em 18,25 MWh/ano na primeira contra 25,50 MWh/ano da segunda).

As perdas por exposição a períodos de sobreamento são três vezes maiores na usina fotovoltaica UFLA (8,9%) em comparação com a usina fotovoltaica ADUFLA (2,9%). O número de módulos solares cinco vezes maior na primeira (250 unidades contra 50 unidades) indica uma possível fonte de perdas por qualidade de módulos; as pequenas degradações unitárias por módulo acumulam seis vezes mais perda energética (3,1% contra 0,5%), mostrando que um número menor de células solares de maior potência tende a ser mais eficiente (54 W contra 330 W).

Por fim, estudos detalhados podem ser realizados para avaliar sistemas fotovoltaicos usando diferentes tecnologias (como materiais monocristalinos, filmes finos, etc.), que ajudarão na identificação de preços mais acessíveis em projetos de engenharia econômica posteriores e aumento da participação da fonte de energia solar na malha elétrica nacional.

REFERÊNCIAS

BOUZGUENDA, M., OMAIR, A., NAEEM, A., MUTHAFFAR, M., WAZIR, O.. **Design of an Off-grid 2 kW Solar PV System**. 2014. In Proceedings of 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, p. 1-6. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6844001>.

BRITO, R. R. O.. **Qualidade da Energia Elétrica em Sistemas de Geração Fotovoltaicos Instalados na UFLA**. 2017. XII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica.

ELMINIR, H. K.. **Effect of Dust on the Transparent Cover of Solar Cells Collectors**. 2006. Energy Conversion and Management, p. 3192-3203.

INMET. **Consulta Dados da Estação Convencional: LAVRAS (MG)**. [S.I.], 2019. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/sim/sonabra/dspDadosCodigo.php?ODM2ODc=>.

IRWAN, Y. M., AMELIA, A. R., IRWANTO, M., FAREQ, M., LEOW, W. Z., GOMESH, N., SAFWATI, I.. **Stand-alone Photovoltaic (SAPV) System Assessment Using PVSyst Software**. 2015. Energy Procedia 2015, p. 596-603. Em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215022717>.

KANDASAMY, C. P., PRABU, P., NIRUBA, K.. **Solar Potential Assessment Using PVSyst Software**. 2013. In Proceedings of 2013 International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE), p. 667-672. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/6823519>.

KARKI, P., ADHIKARY, B., SHERPA, K. Sherpa. **Comparative Study of Grid-tied Photovoltaic (PV) System in Kathmandu and Berlin Using PVSyst**. 2012. Proceedings of 2012 IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), Kathmandu, p. 196-199. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/6357397>.

KUMAR, N. M., KUMAR, M. R., REJOICE, P. R., MATHEW, M.. **Performance Analysis of 100 kWp Grid Connected Si-poly Photovoltaic System Using PVSyst Simulation Tool**. 2017. Energy Procedia V.117, p. 80-89. Disp em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217323287>.

KUMAR, B. S., SUDHAKAR, K.. **Performance Evaluation of 10 MW Grid Connected Solar Photovoltaic Power Plant in India**. 2015. Energy Reports, p. 184-192. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484715000311>.

MANI, M.; PILLAI, R.. **Impact of Dust on Solar Photovoltaic (PV) Performance: Research Status, Challenges and Recommendations**. 2010. Renewable and Sustainable Energy Reviews, p. 3124-3131.

MATIYALI, K., ASHOK, A.. **Performance Evaluation of Grid Connected Solar PV Power Plant**. 2016. Proceedings of 2016 2nd International Conference on Advances in

Computing, Communication, & Automation (ICACCA), p. 1-5. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/7748989>.

MERIEEM, C., BOUMDIÈNE, B., ASMA, C., MOHAMED, B. M., AICHA, S.. **Study of a Photovoltaic System Connected to the Network and Simulated by the Code PVSyst**. 2014. In Proceedings of 2014 North African Workshop on Dielectric Materials for Photovoltaic Systems (NAWDMPV), p. 1-5. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/6997605>.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., GONÇALVES, A. R., COSTA, R. S., LIMA, F. J. L.. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2017. São José dos Campos - Brasil, 2ª edição. Disponível em http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L., RÜTHER, R.. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2006. São José dos Campos - Brasil, 2ª edição. Disponível em <ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros.html>.

PVSyst User Manual. Disponível em <http://files.pvsyst.com/help/>.

SANTOS, M. F.; DIAS, R. N.; RIBEIRO, E. K. B.. **Estudo de Viabilidade para Implantação de um Gerador Fotovoltaico Conectado à Rede no Campus II do CEFET-MG**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

SHARMA, Vikrant, CHANDEL, S. S.. **Performance Analysis of a 190 kWp Grid Interactive Solar Photovoltaic Power Plant in India**. 2013. Energy 2013. Disp em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213002727>.

STEVE, R.. **The Present Status of kWh/kWp Measuring and Modeling**. 2010. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Velancia, Espanha. Disponível em <http://www.steveransome.com/>.

TALLAB, R., MALEK, A.. **Predict System Efficiency of 1 MWc Photovoltaic Power Plant Interconnected to the Distribution Network Using PVSyst Software**. 2015. Proceedings of 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), p. 1-4. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/7454973>.

TURCOTTE, D.; ROSS, M.; SHERIFF, F.. **Photovoltaic Hybrid System Sizing and Simulation Tools: Status and Needs**. 2001. PV Horizon: Work Shop on Photovoltaic Hybrid Systems, Montreal.

YADAV, P., KUMAR, N., CHANDEL, S. S.. **Simulation and Performance Analysis of a 1kWp Photovoltaic System Using PVSyst**. 2015. Proceedings of 2015 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), p. 0358-0363. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7259481>.