



GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP

SISTEMA DE SUPERVISÃO E AUXÍLIO AO PLANEJAMENTO DO DESPACHO DE PLANTA HÍBRIDA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

**GIANCARLO COVOLO HECK(1); LAERTE CLADEMIR DA ROSA JUNIOR(1); ANA PAULA OENING(1);
LUIS ALEXANDRE CATUSSI PASCHOALOTTO(2); RENATO DE ARRUDA PENTEADO NETO(1);
THIAGO DIAS ALENCAR FERREIRA(2); OSVALDO JOSÉ DE SOUZA(2)
LACTEC(1); CESP(2)**

RESUMO

A diversificação da matriz energética é uma tendência mundial e visa a sustentabilidade pelo uso cada vez maior de fontes de energia renováveis. No Brasil temos um cenário favorável em termos de sustentabilidade, visto que utilizamos fontes renováveis para a geração de cerca de 83% da energia elétrica consumida, contudo, a contribuição da fonte solar é de apenas 1%. Para estimular a inserção da geração heliotérmica na matriz elétrica brasileira a ANEEL incentivou o desenvolvimento de alguns projetos e este trabalho apresenta o sistema supervisor implementado no projeto de geração termossolar que foi integrado ao complexo de energias renováveis da UHE Porto Primavera da CESP.

PALAVRAS-CHAVE

Sistema supervisor, Planta híbrida, Planejamento do despacho, Geração termossolar

1.0 INTRODUÇÃO

A diversificação da matriz energética é uma tendência mundial e visa a sustentabilidade, a preservação do meio ambiente, a redução das emissões de carbono, dentre outros fatores, por meio do uso cada vez maior de fontes de energia renováveis (solar, eólica, geotérmica, hidráulica e biomassa) no lugar das fontes não renováveis (carvão, petróleo e gás natural) (1)(2)(3).

No Brasil, tratando-se especificamente da matriz elétrica, temos um cenário favorável em termos de sustentabilidade, visto que utilizamos fontes renováveis para a geração de cerca de 83% da energia elétrica que consumimos, conforme dados do balanço energético nacional de 2018. Contudo, a contribuição da fonte solar é de apenas 1% da geração total.

Para estimular o aprendizado e a inserção da geração heliotérmica na matriz elétrica brasileira, em setembro de 2015, a Agência Nacional de Energia Elétrica fez uma chamada de projetos de pesquisa e desenvolvimento estratégicos intitulada "Desenvolvimento de Tecnologia Nacional de Geração Heliotérmica de Energia Elétrica", sendo na ocasião aprovado o desenvolvimento do projeto "Implantação de usina piloto por meio de integração da fonte de geração termossolar ao complexo de energias renováveis da UHE Porto Primavera", projeto no qual foi desenvolvido este sistema supervisor.

O sistema permite o acompanhamento do estado de operação de todo o complexo de energias renováveis por meio de uma tela de visão geral (*dashboard*), a qual exibe informações como as gerações instantâneas, os montantes de energia produzida e/ou consumida, para o caso dos armazenadores por baterias e hidrogênio, bem como totalizadores de produção diários e mensais. Além disto, também possui telas de detalhes de cada planta, para a visualização das medições dos diversos equipamentos que compõe cada uma delas. Até onde se sabe, este é o único sistema com tecnologia nacional que propicia o monitoramento de uma planta híbrida de energias renováveis.

Adicionalmente à funcionalidade de supervisão, o sistema auxilia no planejamento do despacho de geração da planta termossolar pois possui um módulo de previsão que sugere os modos de operação a serem utilizados nesta planta. Este módulo funciona com base em algoritmos de previsão implementados na linguagem *python* e que utilizam os dados históricos de uma estação solarimétrica completa para efetuar a previsão da irradiação direta normal, da temperatura e da velocidade do vento para as próximas 24 horas. De posse destes dados, os operadores da planta podem planejar e selecionar os modos de operação mais adequados a serem utilizados.

Este trabalho apresenta os detalhes do sistema supervisório desenvolvido e implantado junto à Usina Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta (Porto Primavera) da Companhia Energética de São Paulo – CESP. As próximas seções estão organizadas da seguinte forma. A seção 2 apresenta as características das plantas do complexo de energias alternativas renováveis da UHE Porto Primavera, a seção 3 descreve os algoritmos de previsão que foram integrados no sistema, a seção 4 detalha o sistema supervisório desenvolvido e na seção 5 são apresentadas as conclusões.

2.0 O COMPLEXO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS RENOVÁVEIS

A Usina Hidrelétrica de Porto Primavera está localizada no município de Rosana, estado de São Paulo. Sua barragem de 10,2 km de comprimento e 2.250 km² de reservatório a tornam a mais extensa do Brasil. Possui 14 unidades geradoras que resultam em uma capacidade instalada de 1.540 MW.

Com o objetivo de tornar a UHE Porto Primavera um polo de pesquisa de fontes renováveis, uma série de projetos foram responsáveis pela construção do complexo de energias alternativas renováveis, sendo o projeto da planta Termossolar (CSP) o responsável pela integração dos dados de todos eles em um único sistema, excluindo-se desta integração a usina hidrelétrica, que por questões de segurança permanece operando de forma isolada. A Tabela 1 lista os sistemas que compõem o complexo, bem como suas siglas utilizadas no sistema supervisório e suas potências instaladas.

TABELA 1 – Lista dos sistemas que compõem o complexo de energias alternativas renováveis.

Sistema de geração / armazenamento	Sigla	Potência
Termossolar	CSP	500 kW
Fotovoltaica 1 - painéis rígidos monocristalinos	UFV1	250 kWp
Fotovoltaica 2 - painéis rígidos policristalinos sem tracker	UFV2	50 kWp
Fotovoltaica 3 - painéis flexíveis amorfos (filme Fino)	UFV3	250 kWp
Fotovoltaica 6 - painéis rígidos policristalinos com tracker	UFV6	50 kWp
Fotovoltaica 7 - painéis rígidos monocristalinos em talude	UFV7	400 kWp
Eólica	AG1 e AG2	200 kW
Baterias (eletroquímica)	ARB	500 kW
Hidrogênio (eletrolisador + tanque + célula combustível)	ARH	200 kW

Como pode ser observado na Tabela 1 os sistemas abrangem uma grande diversidade de equipamentos de geração e armazenamento de energia. Todos eles estão interligados no barramento de serviço da usina hidrelétrica, permitindo a redução do gasto interno de energia da própria usina. A Figura 1 apresenta uma vista aérea da UHE Porto Primavera e de alguns dos sistemas do complexo de energias renováveis, com destaque para a planta CSP.



FIGURA 1 – Vista aérea da UHE Porto Primavera e do complexo de energias renováveis.

3.0 ALGORITMOS DE PREVISÃO

Os algoritmos de previsão executados junto ao sistema supervisório fazem o processamento dos dados recebidos da estação solarimétrica instalada junto à UHE Porto Primavera para sugerir os modos de operação a serem utilizados no controle da planta Termossolar.

O processamento ocorre em duas etapas, na primeira etapa são executados os passos de tratamento, preenchimento e previsão para as próximas 24 horas de dados das seguintes medições: radiação solar direta (*Direct Normal Irradiance* - DNI), radiação solar difusa, radiação solar global, velocidade do vento e temperatura do ar.

O tratamento dos dados faz a verificação da qualidade dos dados recebidos, elimina dados fora das faixas esperadas e os dados nulos. Em seguida ocorre o preenchimento de dados faltantes, que substitui os valores ruins ou errados e as faltas ou falhas de dados. E por último, é executada a previsão destas medições para o período das próximas 24 horas (dia seguinte). Estes tratamentos são ilustrados nos gráficos da Figura 2, o gráfico da esquerda indica um exemplo de preenchimento de dados de DNI, trechos em verde, enquanto o gráfico da direita destaca os dados de DNI previstos, trechos em laranja. No eixo X dos gráficos é representada a linha do tempo, em minutos (1440 pontos), de um dia, visto que os dados são recebidos da estação solarimétrica minuto a minuto.

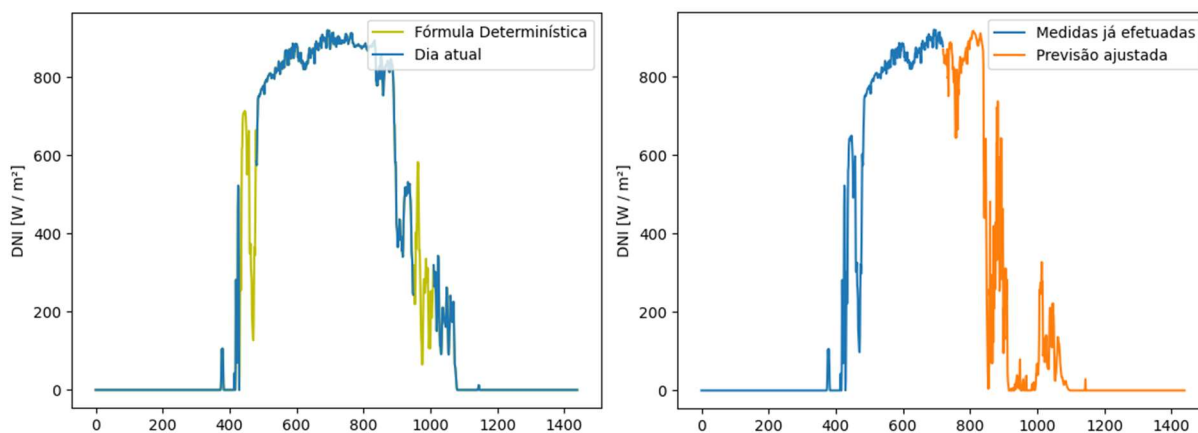


FIGURA 2 – Exemplo de preenchimento do DNI (esq.) e exemplo de previsão do DNI no restante do dia (dir.).

Os algoritmos de processamento e previsão foram implementados em linguagem *Python*, integrados no sistema supervisorio e estão programados para serem executados a cada 15 minutos. A Figura 3 ilustra a tela do sistema que mostra os dados recebidos da estação, bem como o gráfico com os dados do DNI recebidos (em verde) e previstos (em azul), além de uma foto da estação solarimétrica.

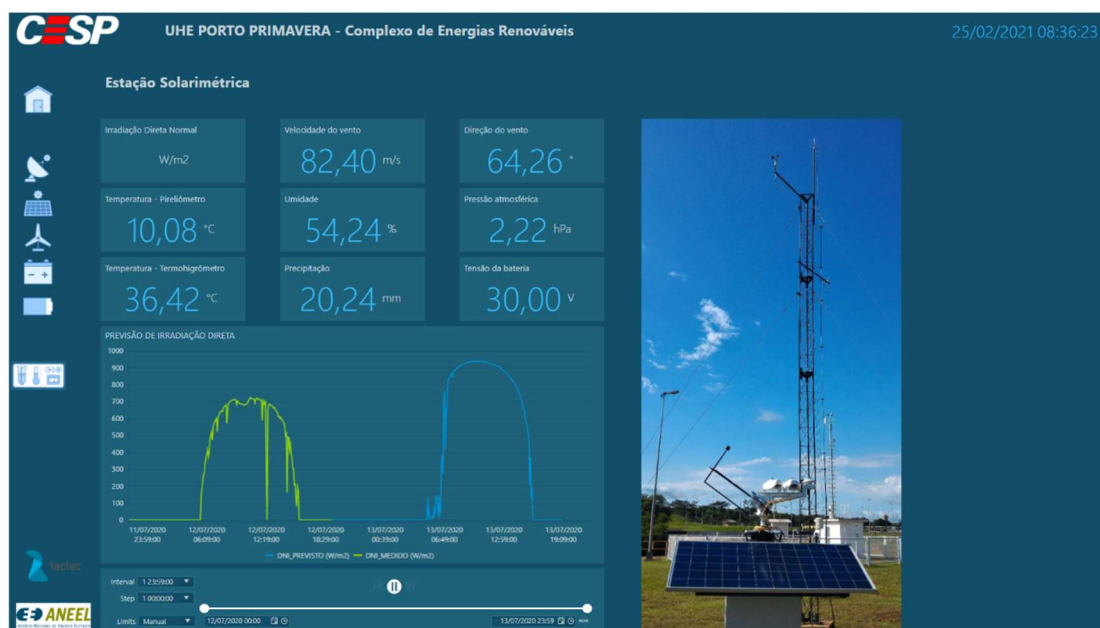


FIGURA 3 – Tela do sistema supervisorio com os dados da estação solarimétrica.

Os dados resultantes do processamento da primeira etapa são armazenados no banco de dados do sistema e posteriormente são passados aos algoritmos do modelo de previsão da geração de energia da usina CSP, que corresponde à segunda etapa de processamento. Como resultado da execução dos algoritmos de previsão da segunda etapa é obtida uma curva horária que indica quais modos de operação são sugeridos para serem utilizados durante as próximas 24 horas de operação da usina CSP. A Figura 4 ilustra a curva resultante entregue por este processamento.

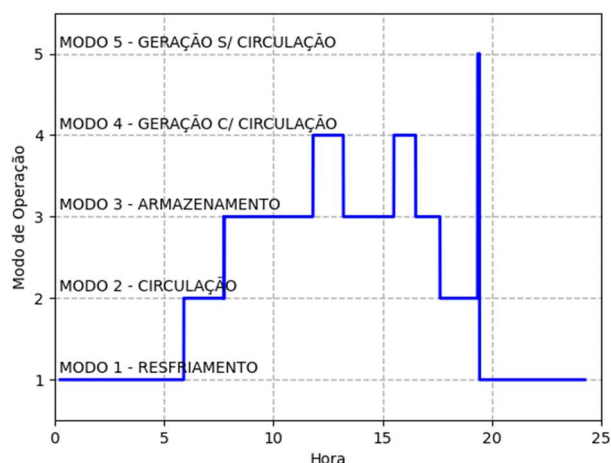


FIGURA 4 – Exemplo de resultado dos algoritmos de previsão de geração CSP.

Como pode ser observado na Figura 4, o sistema propõe cinco diferentes modos de operação para a planta CSP, quais sejam: resfriamento, circulação, armazenamento, geração com circulação e geração sem circulação. Estes modos de operação indicam as combinações possíveis de operação da planta CSP, que é composta por dois módulos principais, o primeiro é o campo solar, responsável pela circulação de fluido e armazenamento de calor, e o segundo é o sistema de geração, que se subdivide em um bloco de produção de vapor (caldeira) e um de produção de energia. A Figura 5 apresenta um diagrama da planta CSP com seus componentes para ajudar no entendimento do sistema.

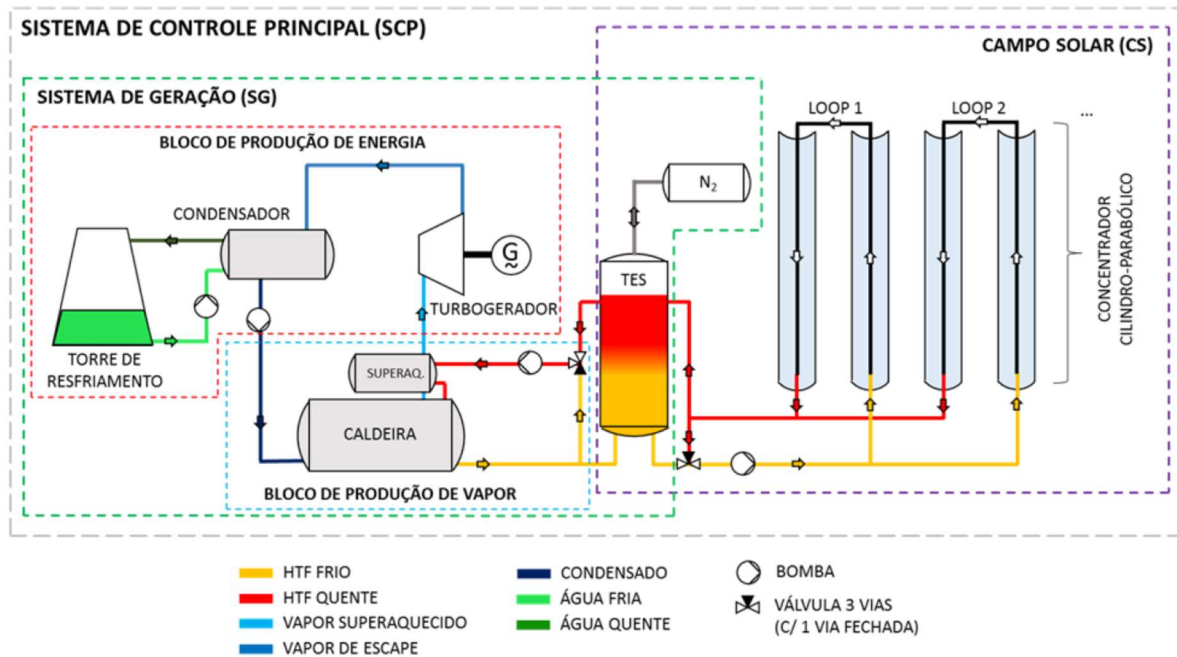


FIGURA 5 – Diagrama da planta de geração Termossolar (CSP).

Estes modos de operação indicados pelo algoritmo de previsão de geração são modos simplificados, pensados desta forma para servir de orientação aos operadores do sistema de automação da planta termossolar, pois é de conhecimento que esta possui diversas etapas e seqüências a serem seguidas para efetivamente ser operada. Portanto, os significados simplificados de cada modo indicam que: no modo 1, de resfriamento, a planta está com seus módulos parados; no modo 2, de circulação, existe circulação de fluido no campo solar mas sem acúmulo de calor; no modo 3, de armazenamento, existe circulação de fluido e também o acúmulo de calor no tanque; no modo 4, inicia-se a produção de energia e mantém-se a circulação de fluido e o armazenamento de calor; e por fim no modo 5, existe a produção de energia mas sem a circulação e acúmulo de calor.

A Figura 6 ilustra a tela do sistema de automação da planta CSP onde os operadores fazem a programação das estratégias de operação da usina. Neste ponto que o sistema supervisor, com auxílio dos algoritmos de previsão de geração, deve auxiliar aos operadores na programação do acúmulo de calor e do despacho de geração de energia.

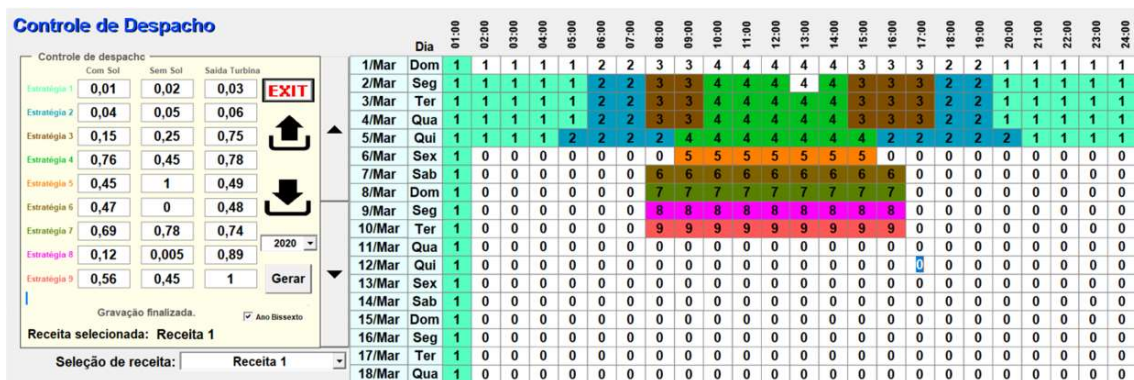


FIGURA 6 – Tela de configuração das estratégias de despacho no sistema de automação da CSP.

4.0 O SISTEMA DE SUPERVISÃO

O sistema de supervisão desenvolvido integra dois sistemas de automação e controle, o da planta termossolar, que além dos dados da usina CSP também encaminha os dados das medições da estação Solarimétrica, e o dos sistemas de armazenamento de energia por baterias e por hidrogênio, sendo que este último também agrega os dados das usinas fotovoltaicas e eólicas (4)(5). A Figura 7 apresenta a arquitetura de conexão entre os sistemas e a distribuição das plantas geradoras entre os sistemas de automação e controle.

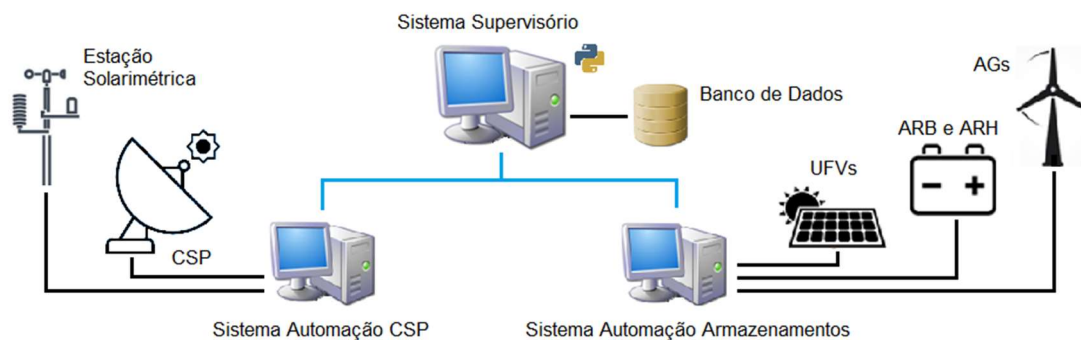


FIGURA 7 – Arquitetura do sistema supervisório.

O sistema possui interface WEB para o acesso dos usuários, o que permite o acesso compartilhado entre diversos tipos de usuários, tanto dos operadores das plantas quanto do pessoal administrativo ou das áreas de engenharia. Suas telas foram projetadas para serem acessadas de forma rápida e seguem uma ordem hierárquica. A Figura 8 ilustra a forma de navegação entre os níveis de telas.

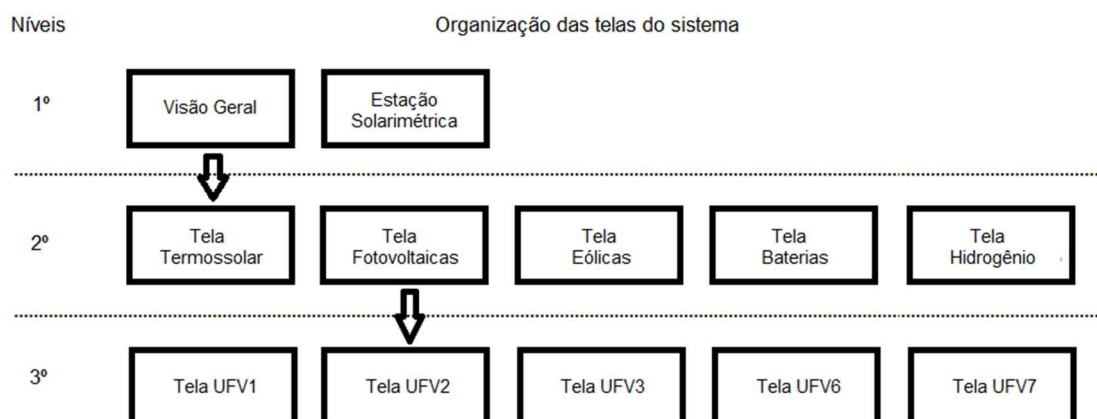


FIGURA 8 – Navegação hierárquica entre as telas do sistema.

O sistema é executado em uma máquina servidora com sistema operacional Windows Server 2016 com dois processadores Intel Xeon de 2.10 GHz, 8 GB de memória RAM e 200 GB de armazenamento em disco. O banco de dados utilizado é o SQL Server 2019 e até o momento da escrita deste trabalho apresenta ocupação de 95 GB.

A tela principal do sistema é ilustrada na Figura 9. Na parte superior de cada coluna são exibidas as medições de geração instantânea total e de geração instantânea de cada uma das usinas. Estas medidas são mostradas de forma numérica e de forma gráfica, por meio de um medidor radial, para que o usuário identifique visualmente a quantos por cento da capacidade máxima está operando cada planta, visto que as escalas dos medidores estão ajustadas para a capacidade de cada planta.



FIGURA 9 – Tela principal do sistema supervisório desenvolvido.

Ainda na tela principal são exibidas as informações de capacidade de geração das plantas de armazenamento, os valores acumulados de energia produzida/consumida diária e mensal para cada uma das plantas e as principais medidas da estação solarimétrica.

Nas telas dedicadas a cada usina em particular são exibidos mais dados de operação, de acordo com o tipo de cada planta, como por exemplo na usina CSP são exibidos o ângulo de rastreamento CSP, as temperaturas do fluido na entrada do campo solar, na entrada do tanque de armazenamento, na entrada e na saída da caldeira, entre outros. A Figura 10 ilustra a tela de supervisão da planta Termossolar.



FIGURA 10 – Tela de supervisão da planta Termossolar.

A Figura 11 ilustra mais algumas telas do sistema, como a tela sumário das usinas fotovoltaicas, a tela da usina fotovoltaica 7, a tela da usina de armazenamento por baterias e a de armazenamento por hidrogênio.

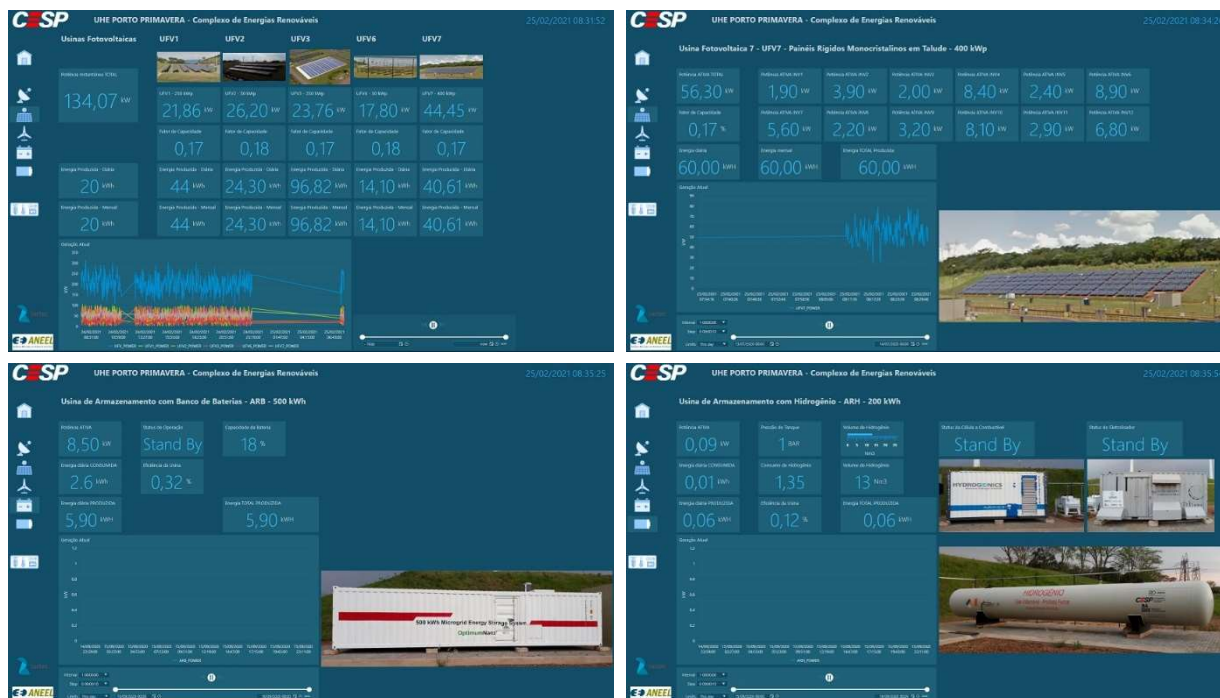


FIGURA 11 – Telas de supervisão do sistema.

O sistema de gerenciamento de informações adotado como base para o desenvolvimento do supervisório é um software PIMS (*Plant Information Management System*), que possui módulos que permitem desde a coleta, processamento, armazenamento, simulação e visualização dos dados. Por possuir uma arquitetura orientada a serviços (*Service Oriented Architecture* - SOA) possibilita a distribuição de cargas de processamento e otimização de recursos (6)(7).

Outra característica importante é que o sistema permite o armazenamento de um grande volume de dados, pois utiliza um algoritmo de compactação de dados, tornando o seu uso adequado em aplicações uma grande quantidade de informações.

5.0 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta o sistema supervisório desenvolvido e implantado junto à Usina Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta (Porto Primavera) da Companhia Energética de São Paulo – CESP. Descreve os módulos de tratamento e previsão de dados utilizados nos algoritmos de previsão de geração da planta Termossolar, detalha a integração dos sistemas de automação e ilustra as telas do sistema.

Como trabalhos futuros, vislumbra-se que a implantação e operacionalização do sistema supervisório permitirá a ampliação dos estudos sobre a complementaridade dos diversos tipos de geração elétrica por fontes renováveis e, principalmente, o avanço do conhecimento sobre a utilização e a viabilidade econômica das plantas termossolares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) WEI, Y.; LI, Y.; WU, M.; LI, Y. *The decomposition of total-factor CO₂ emission efficiency of 97 contracting countries in Paris Agreement*. Energy Econ. vol. 78. p. 365–378. fev. 2019.
- (2) LIMA, M. A. et al. *Renewable energy in reducing greenhouse gas emissions: reaching the goals of the Paris agreement in Brazil*. Environ. dez. 2019.
- (3) NONG, D.; SIMSHAUSER, P. *On energy and climate change policies: The impact of baseline projections*. Appl. Energy. vol. 269. p. 115062. jul. 2020.
- (4) KLEIN, R. S. *Automatização e Supervisão de Microgrid Baseada em Energias Renováveis*. Projeto de Diplomação. Porto Alegre. 2016.
- (5) FARRET, F. A.; SIMÕES, M. G. *Integration of Alternative Sources of Energy*. IEEE Press. John Wiley & Sons, Inc. Canada. 2006.
- (6) POSSER, M. S.; DE ROSSI, E. R. *Historiadores: Requisitos para um Sistema de Armazenamento e Gerenciamento de Informações*. Revista InTech. p. 41–46. 2012.
- (7) SHAH, Y. T. *Hybrid Power: Generation, Storage, and Grids*. CRC Press. 2021.

DADOS BIOGRÁFICOS



GIANCARLO COVOLO HECK é pesquisador do LACTEC e doutorando em Informática pela Universidade Federal do Paraná. Possui mestrado em Informática (2008) e bacharelado em Ciência da Computação (2004) pela UFPR. Tem experiência na pesquisa e no desenvolvimento de sistemas de computação de alto desempenho, sistemas embarcados, sistemas de comunicação com e sem fio e sistemas de monitoramento em tempo real. Seus interesses de pesquisa incluem redes e protocolos de comunicação, redes de sensores sem fio, mineração de dados, análise de dados, sistemas de controle de fontes de energia renováveis, redes inteligentes, cidades inteligentes e a internet das coisas (IoT).

(2) LAERTE CLADEMIR DA ROSA JUNIOR, pesquisador no departamento de Eletrônica no Lactec. Engenheiro Eletricista formado pela PUCPR em 2005, com especialização em Teleinformática e Redes de Computadores pela UTFPR 2007 e mestrado profissional em Desenvolvimento de Tecnologias pelo Lactec 2015. Principais conhecimentos e atuações: Desenvolvimento de Sistemas Eletrônicos Embarcados; Medição de energia; Microcontroladores; Desenvolvimento de Firmware; Hardware Security Module (HSM); Segurança de comunicação SSL/TLS; Sistemas de Comunicação; Protocolos de Automação Industrial; Internet das Coisas - IoT (LoRaWAN, MQTT); Eletrônica voltada para equipamentos de saúde/fitness (Bluetooth Low Energy -BLE e ANT).

(3) ANA PAULA OENING, graduada em Matemática Industrial pela UFPR (2004), com mestrado em otimização não linear (2006) e doutorado em previsão de carga (2014), obtidos no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (PPGMNE) da UFPR. Pesquisadora dos Institutos Lactec, na área de Sistemas Elétricos e professora no Mestrado Profissional em Desenvolvimento de Tecnologia (Lactec). Atua no desenvolvimento de propostas, negociação, gerência e execução de projetos de Pesquisa & Desenvolvimento. Tem experiências nas áreas de planejamento e operação de sistemas de energia elétrica, mercado e comercialização de energia, análise de viabilidade econômica, pesquisa operacional, otimização, inteligência computacional e previsão de séries temporais.

(4) LUIS ALEXANDRE CATUSSI PASCHOALOTTO, engenheiro Mecânico pela UNESP (Universidade Estadual Paulista) e Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia pelos Institutos LACTEC. Atualmente é Gerente de Engenharia de O&M e da UHE Paraibuna na CESP. Atuou como Gerente de Eng. Eletromecânica, Engenheiro de Manutenção Eletromecânica na UHE Porto Primavera (1540 MW) e na Engenharia de Manutenção Corporativa da CESP. Teve também experiência em manutenção e produção na Cargill Agrícola S/A - Unidade de Três Lagoas entre 2009 e 2010 como Engenheiro de Manutenção.

(5) RENATO DE ARRUDA PENTEADO NETO, é pós-doutor (2021) e doutor em Engenharia de Materiais (2005), mestre em Física (1996) e Engenheiro Eletricista (1977). Todos os títulos foram obtidos na Universidade Federal do Paraná. É consultor ad hoc do CNPq. É líder do grupo de pesquisas certificado no CNPq, com o tema "Estudos sobre a emissão de poluentes e o desempenho mecânico de veículos e motores a combustão alimentados por combustíveis fósseis e biocombustíveis". Diretor da P&K Consultoria (Curitiba). Pesquisador aposentado dos Institutos Lactec, onde continua atuando como consultor na coordenação de projetos de pesquisa e em atividades correlatas.

(6) THIAGO DIAS ALENCAR FERREIRA, possui experiência Profissional na CESP - desde 10/2010. Principais atribuições: Gestão de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento em Armazenamento de Energia; Atuação em gestão de riscos; Análise de ocorrências com Hidrogeradores, KPIs das Usinas e execução de planos de manutenção; Elaboração e execução de Capex; Implantação de fontes renováveis: UFVs e Geradores Eólicos; Coordenação de time de campo em projetos de modernização; Especificação técnica de equipamentos e sistemas para UHEs; Desenvolvimento de instruções de manutenção. Formação Acadêmica Especialista em Automação Industrial, MBA, latu senso, pela USP. 06/2013. Engenheiro Eletrecista pela UNESP - Iha Solteira. Dez/2007.

(7) OSVALDO JOSÉ DE SOUZA, 52 anos, Engenheiro Eletricista, Pós Graduado em Audomação Industrial, concluindo Mestrado no LACTEC. Trabalha na CESP desde 1998, comecei como engenheiro eletricista, depois coordenador de O&M e hoje estou como consultor de Engenharia. Participei do comissionamento das UGs da UHE Porto Primavera, da modernização de varios sistema da UHE Porto Primavera como: a- Sistema Digital de Supervisão e Controle; b- Sistema de Proteção de Gerador/Transformador; c- Sistema de Regulador de Velocidade e de Tensão e outros. Participei de varios P&D sobre Fotovoltaicas, Armazenamento de Energia a Bateria e a Hidrogênio e Usina Termosolar.