

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ROBERTO SIHNEL

**PROJETO, INSTALAÇÃO E TESTES EXPERIMENTAIS PRELIMINARES DE UM
SISTEMA A-CAES (ADIABATIC COMPRESSOR AIR ENERGY STORAGE) EM
ESCALA LABORATORIAL**

PONTA GROSSA

2023

ROBERTO SIHNEL

PROJETO, INSTALAÇÃO E TESTES EXPERIMENTAIS PRELIMINARES DE UM SISTEMA A-CAES (ADIABATIC COMPRESSOR AIR ENERGY STORAGE) EM ESCALA LABORATORIAL

Project, setup, and preliminary experimental tests of an Adiabatic Compressor Air Energy Storage (A-CAES) system in laboratory scale

Dissertação apresentada o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Área de Concentração: Térmicas e Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antonini Alves
Coorientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne

PONTA GROSSA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



ROBERTO SIHNEL

PROJETO, INSTALAÇÃO E TESTES EXPERIMENTAIS PRELIMINARES DE UM SISTEMA A-CAES (ADIABATIC COMPRESSOR AIR ENERGY STORAGE) EM ESCALA LABORATORIAL

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Térmica E Fluidos.

Data de aprovação: 26 de Outubro de 2023

Dr. Thiago Antonini Alves, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Gerson Henrique Dos Santos, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Marcelo Ferreira Pelegrini, Doutorado - Petróleo Brasileiro - Petrobras

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 26/10/2023.

Dedico este trabalho à minha esposa Jo e à
minha filha Juju, à minha mãe Leonilda Grein
Sihnel e meu pai Adalberto Helmuth Sihnel
(*in memoriam*) que são minhas fontes de
amor e inspiração, e que tanto me ajudaram
na minha formação em engenharia.

AGRADECIMENTOS

Este espaço é dedicado às pessoas que me auxiliaram especificamente na conclusão deste pequeno texto, que fazem parte da minha vida profissional, acadêmica, familiar e espiritual.

Em primeiro lugar, agradeço à Deus, Senhor da Ciência e da Sabedoria, que nos dá ânimo para realizar nossos trabalhos e estudos.

Aos professores Jhon, Thiago e Yara, Luiz, que muito compreendem da humanidade, do que é ser um funcionário onde há exigência de dedicação forte, que entendem a realidade de ter tempo para a família e que muito auxiliaram inclusive a não desistir, persistir sempre. Meu muito obrigado!

Aos colegas de mestrado Felipe Biglia, Pedro Ochoski Machado, Douglas Vasconcellos, Wagner Barth, Victor Levartoski, Vivian Machado, Marcelo Machado e Victor Dimbarre! Valeu turma pelas ajudas e força total!

Aos meus chefes Leandro Carlos Neves e Danilo Carvalho de Gouveia, a Danilo José Raffo e a Companhia Paranaense de Saneamento S/A (SANEPAR), que permitiram que eu estudasse em compensação de expediente, por contribuir para meu desenvolvimento profissional.

À minha família, especialmente minha esposa Josete, que tanto me incentiva e me cobra para realizar as tarefas no prazo certo e à minha filha Juliana, que me dão amor, diversão e arte.

A boa perspectiva do “impossível” é que mesmo ele é realizável!
(Autoria própria - Roberto Sihnel)

RESUMO

Nos países desenvolvidos, a demanda de energia per capita tende a ser muito superior em relação àqueles que possuem um modelo econômico ineficiente. Também, é fato que a energia vem sendo consumida em maior quantidade com o passar do tempo. Encaixando-se sob a forma de armazenamento de energia, a Estocagem de Energia por Compressão de Ar Adiabática, do inglês, *Adiabatic Compressor Air Energy Storage* (A-CAES) pode funcionar como estabilizador de intermitências de sistemas de energia elétrica gerada por sistemas renováveis ou instáveis, tornando essa energia disponível no local e na hora adequada da sua utilização, sem precisar enviá-la para a rede de distribuição que, em determinados momentos, pode estar indisponível ou inapta para recebê-la. As plantas industriais utilizam o conceito de compressão estagiada por turbo-máquinas de grande porte e geração com o mesmo equipamento. As utilizações são um pouco diferentes, porém visam garantir o fornecimento contínuo e estável de energia. Visando contribuir com o desenvolvimento de sistemas A-CAES, esta pesquisa projeta um sistema A-CAES em escala laboratorial e o coloca à prova para uma análise operacional preliminar. O sistema projetado, construído e analisado possui capacidade de armazenamento de 200L de ar comprimido à 12bar de pressão, com capacidade de geração fotovoltaica de 5,9kW, regeneração elétrica de 3,5kVA (alternador bifásico 220V), com rendimento global obtido experimentalmente de 18%.

Palavras-chave: A-CAES; armazenamento de energia; geração distribuída; ar comprimido; energia renovável.

ABSTRACT

In developed countries, per capita energy demand tends to be much higher than those with an inefficient economic model. Also, it is a fact that energy has been consumed in greater quantities over time. Fitting in the form of energy storage, the Adiabatic Compressor Air Energy Storage (A-CAES) can function as an intermittency stabilizer for electrical power systems generated by renewable or unstable systems, making this energy available at the appropriate place and time of its use, without having to send it to the distribution network that, at certain times, may be unavailable or unfit to receive it. The industrial plants use the concept of compression staged by large turbo-machines and generation with the same equipment. The uses are a little different, but they aim to ensure the continuous and stable supply of energy. Aiming to contribute to the development of A-CAES systems, this research designs an A-CAES system on a laboratory scale and puts it to the test for a preliminary operational analysis. The system designed, built and analyzed has a storage capacity of 200L of compressed air at 12bar of pressure, with photovoltaic generation capacity of 5.9kW, electrical regeneration of 3.5kVA (two-phase alternator 220V), with an overall yield obtained experimentally of 18%.

Keywords: A-CAES; energy storage; distributed generation; compressed air; renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plano decenal de expansão de energia elétrica: PDE 2030.....	20
Figura 2 - Espectro de aplicações e tecnologias de armazenamento de energia elétrica.....	24
Figura 3 - Principais números do armazenamento e uso de energia em relação.....	25
Figura 4 - Diagramas pressão x volume específico (p-v) e temperatura x entropia (T-s) para Ciclo <i>Brayton</i> ideal.	30
Figura 5 - Esquema para aproveitamento energético do CAES na China.....	32
Figura 6 - Desenho esquemático de um sistema A-CAES.....	33
Figura 7 - Planta ilustrativa de um L-CAES comercialmente disponível.....	44
Figura 8 - Resumo de tecnologias CAES comercialmente disponíveis.....	45
Figura 9 - Metodologia proposta para o estudo experimental.....	47
Figura 10 - Resumo de equipamentos projetados no sistema A-CAES.....	49
Figura 11 - Dimensões do gerador elétrico de 4kVA, 220V, trifásico, 4 pólos e 60 Hz.....	56
Figura 12 - Dimensões da turbina pneumática 7,5HP, 17N.m e operação de 4bar a 7bar.....	57
Figura 13 - Diagrama de perdas anuais.....	75
Figura 14 - Diagrama unifilar de ligações dos painéis fotovoltaicos.....	78
Figura 15 - Desenho esquemático da casa de máquinas: vistas e cortes.....	80
Figura 16 - Quadro de comando e seu gabinete com dispositivos.....	82
Figura 17 - Sistema pneumático do Sistema A-CAES.....	85
Figura 18 - Dados técnicos do alternador (gerador) instalado.....	92
Figura 19 - Croqui elétrico de geração fotovoltaica.....	93
Figura 20 - Lista de símbolos elétricos.....	94
Figura 21 - Diagrama simplificado do sistema de geração solar, inversor e comando simplificado.....	95
Figura 22 - Sistema elétrico de geração fotovoltaica: proteções do QDCC.....	96
Figura 23 - Quadro geral de baixa tensão: QDCA, ventiladores e fonte 24VCC.....	97
Figura 24 - Croqui elétrico de alimentação do motor do compressor e das resistências elétricas.....	98
Figura 25 - Croqui comunicação do CLP com inversor solar (registro de variáveis).....	99
Figura 26 - Croqui alimentação elétrico do CLP.....	100

Figura 27 - Entradas digitais do CLP.....	101
Figura 28 - Saídas digitais do CLP: comando do compressor.....	102
Figura 29 - Entradas analógicas do CLP: sinal do sensor de pressão.....	103
Figura 30 - Saída analógica do CLP: controle da válvula elétrica.....	104
Figura 31 - Sinalizações de funcionamento.....	105
Figura 32 - Vista geral dos cartões do CLP: diagrama de bornes.....	106
Figura 33 - Código Ladder™ principal: registros de sensores.....	111
Figura 34 - Código Ladder™ principal: setup da abertura da válvula e do sensor de pressão.....	112
Figura 35 - Código Ladder™ principal: registros do acionamento do compressor.....	113
Figura 36 - Código Ladder™ principal: registros das grandezas elétricas da geração fotovoltaica.....	114
Figura 37 - Código Ladder™ principal: setup da frequência do inversor.....	115
Figura 38 - Código Modbus™: exportação dos dados.....	116
Figura 39 - Programação inversor WEG™ CFW 500: tela 01 - consumo de energia.....	117
Figura 40 - Programação inversor WEG™ CFW 500: setup da frequência do motor do compressor.....	117
Figura 41 - Programação inversor WEG™ CFW 500: tela 02 - teclas funcionais diretas.....	118
Figura 42 - Programação inversor WEG™ CFW 500: tela 03 - dados elétricos da geração solar.....	118
Figura 43 - Programação inversor WEG™ CFW 500: exportação dos registros de dados elétricos da geração solar.....	119
Figura 44 - Programação inversor WEG™ CFW 500: tela 04 - tela inicial de saudação e mostrador de tensão aplicada de geração solar.....	119
Figura 45 - Programação inversor WEG™ CFW 500: tela 05 - mostrador de pressão operacional e temperatura.....	120
Figura 46 - Programação inversor WEG™ CFW 500: tela 06 - mostrador de setup manual da abertura da válvula.....	121

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Localização selecionada para instalação da casa de máquinas: visão geral.....	79
Fotografia 2 - Localização selecionada para instalação da casa de máquinas: vista lateral.....	79
Fotografia 3 - Casa de máquinas	80
Fotografia 4 - Casa de máquinas: compressor, reservatório, turbina, alternador elétrico, sistema pneumático de controle, válvula elétrica, válvula, registro, regulador e lubrificador.....	81
Fotografia 5 - Conjunto de painéis fotovoltaicos instalado no Bloco J1 da UTPFR/Ponta Grossa	82
Fotografia 6 - Compressor selecionado e instalado	86
Fotografia 7 - Dados nominais do vaso de pressão acoplado ao compressor selecionado e instalado	86
Fotografia 8 - Acessórios pneumáticos instalados: filtro coalescente, sensor de pressão IFM™, lubrificador, válvula elétrica PID e sensor de temperatura.....	87
Fotografia 9 - Sensor de rotação (velocidade angular) instalado no eixo da turbina pneumática	88
Fotografia 10 - Inversor de frequência e CLP utilizados no Sistema A-CAES ...	90
Fotografia 11 - Comando do painel elétrico na porta do gabinete.....	90
Fotografia 12 - Disjuntores, disjuntor motor, contactores, <i>string box</i> , fonte 12V e indicador de rotações.....	91
Fotografia 13 - Banco de resistências para dissipação e segurança operacional	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Calculadora Solar Copel™ para Ponta Grossa: 4,9 kWh-p.....	62
Quadro 2 - Simulação para seleção dos painéis fotovoltaicos	70
Quadro 3 - Simulação para seleção dos painéis fotovoltaicos: exigência do consumidor.....	71
Quadro 4 - Simulação para seleção dos painéis fotovoltaicos: resultados principais	72
Quadro 5 - Balanço energético e resultados principais da simulação pelo modelo Perez Meteonorm.....	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Consumo energético por fonte.....	21
Gráfico 2 - Participação percentual das energias renováveis na matriz energética brasileira entre 2013 e 2022.....	22
Gráfico 3 - Comparação da participação de energias renováveis na oferta interna	23
Gráfico 4 - Emissões de CO₂ por subsetor e região, da indústria, no cenário de desenvolvimento sustentável de 2019 a 2070	26
Gráfico 5 - Torque de acionamento no motor pneumático x rotação para diferentes pressões	52
Gráfico 6 - Consumo de ar x rotação para diferentes pressões	52
Gráfico 7 - Rendimento global de Sistema CAES de acordo com a pressão de trabalho	66
Gráfico 8 - Eficiência teórica dos compressores	67
Gráfico 9 - Perfil de consumo fotovoltaico: potência requerida pelo compressor x horário do dia	72
Gráfico 10 - Distribuição energética nos meses do ano.....	73
Gráfico 11 - Índice de rendimento e fração solar nos meses do ano	74
Gráfico 12 - Entrada diária x produção efetiva solar diária	75
Gráfico 13 - Produção diária de energia: distribuição mensal	76
Gráfico 14 - Saída efetiva de energia: distribuição horária prevista.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações básicas do CAES: Planta Térmica Huntorf/ Alemanha	35
Tabela 2 - Especificações básicas do CAES: Planta Térmica McIntosh/EUA....	36
Tabela 3 - Parâmetros básicos de um modelo A-CAES otimizado analiticamente	42
Tabela 4 - Insolação máxima para a latitude e longitude consideradas (anual) em hora solar às 14h.....	50
Tabela 5 - Dados dos equipamentos selecionados.....	58
Tabela 6 - Seleção do compressor e vaso de pressão (reservatório de ar comprimido).....	59
Tabela 7 - Cálculos para reservatório de ar comprimido de 3000L operando em diferentes pressões	60
Tabela 8 - Cálculos para reservatório de ar comprimido de 200L operando a 12bar.....	61
Tabela 9 - Dados técnicos elétricos para painéis fotovoltaicos.....	62
Tabela 10 - Dados técnicos elétricos para inversor	63
Tabela 11 - Resumo de cálculos considerando compressor 3HP, 200L e 12bar.....	65
Tabela 12 - Comparativo de eficiência para diferentes pressões operacionais	66
Tabela 13 - Resumo de perdas e potências requeridas com compressor Chiaperini™ 3HP	68
Tabela 14 - Planilha orçamentária.....	68
Tabela 15 - Dados técnicos dos painéis fotovoltaicas de 150W	83
Tabela 16 - Dados técnicos dos painéis fotovoltaicas de 170W	83
Tabela 17 - Resultados experimentais do sistema A-CAES	122
Tabela 18 - Dados experimentais de alívio de pressão.....	122
Tabela 19 - Eficiência energética experimental por fase do Sistema A-CAES.....	123

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{ent}	<i>área na entrada do reservatório de ar comprimido</i>	$[m^2]$
A_{sai}	<i>área na saída do armazenamento</i>	$[m^2]$
$A_{parede.st}$	<i>velocidade do fluido na entrada</i>	$[m^2]$
c_{ent}	<i>velocidade do fluido na entrada</i>	$\left[\frac{m}{s}\right]$
c_{sai}	<i>velocidade do fluido na saída</i>	$\left[\frac{m}{s}\right]$
c_{ent}	<i>velocidade na entrada do reservatório de ar comprimido</i>	$\left[\frac{m}{s}\right]$
c_{sai}	<i>velocidade na saída do reservatório de ar comprimido</i>	$\left[\frac{m}{s}\right]$
c_p	<i>calor específico à pressão constante</i>	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
c_v	<i>calor específico à volume constante</i>	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
ε	<i>efetividade da transferência no trocador de calor</i>	-
\tilde{C}	<i>capacidade térmica do fluido</i>	$\left[\frac{J}{K \cdot s}\right]$
\tilde{C}_{min}	<i>menor capacidade térmica do fluido no trocador de calor</i>	$\left[\frac{J}{K \cdot s}\right]$
$\cos \varphi$	<i>Fator de potência do gerador</i>	-
C_{turb}	<i>consumo de ar da turbina</i>	$\left[\frac{l}{s}\right]$
ΔH	<i>variação da entalpia</i>	$[J]$
E	<i>energia necessária para cálculo dos painéis fotovoltaicos</i>	$\left[\frac{kWh}{mês}\right]$
η	<i>rendimento do gerador</i>	
$\eta_{turbina}$	<i>rendimento isoentrópico da turbina</i>	
FAD	<i>descarga livre de ar</i>	$\left[\frac{l}{s}\right]$
f_{max}	<i>frequência máxima de operação</i>	$\left[\frac{1}{30} Hz\right]$
FS	<i>fator de serviço</i>	
g	<i>aceleração gravitacional</i>	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$

γ	<i>relação de calores específicos</i>	
h_{ent}	<i>altura de entrada</i>	[m]
h_{sai}	<i>altura de saída</i>	[m]
$H_{entr.st}$	<i>entalpia do ar na entrada do reservatório de ar comprimido</i>	[J]
$H_{entra.turb}$	<i>entalpia do ar na entrada da turbina</i>	[J]
$H_{sai.st}$	<i>entalpia do ar na saída do reservatório de ar comprimido</i>	[J]
$H_{sai.turb}$	<i>entalpia do ar na saída da turbina</i>	[J]
ζ	<i>coeficiente de condutibilidade térmica da parede</i>	$\frac{W}{m \cdot K}$
KVA	<i>potência elétrica ativa do gerador</i>	[kVA]
m	<i>massa de ar</i>	[kg]
M_{ar}	<i>massa molar de ar</i>	[mol]
m_{arm}	<i>massa de ar armazenada</i>	[kg]
\dot{m}_{arm}	<i>vazão mássica de ar no reservatório</i>	$\frac{kg}{s}$
\dot{m}_{cs}	<i>vazão mássica de ar que entra no compressor</i>	$\frac{kg}{s}$
\dot{m}_{ent}	<i>vazão mássica de ar que entra</i>	$\frac{kg}{s}$
\dot{m}_{sai}	<i>vazão mássica de ar que sai</i>	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_{turbina}$	<i>vazão mássica de ar na turbina</i>	$\frac{kg}{s}$
\dot{N}	<i>taxa de geração química de espécies</i>	
\dot{Q}	<i>taxa de transferência de calor</i>	$\frac{J}{s}$
P_g	<i>potência de acionamento do gerador</i>	[kW]
p_{arm}	<i>pressão nominal no interior do reservatório</i>	[Pa]
\dot{p}_{arm}	<i>diferencial de pressão no reservatório em relação ao tempo</i>	$\frac{Pa}{s}$
p_{atm}	<i>pressão atmosférica</i>	[bar]
P_c	<i>potência do compressor</i>	[kW]

p_{c-sai}	<i>pressão de saída no estágio de compressão</i>	[Pa]
p_{c-ent}	<i>pressão de entrada no estágio de compressão</i>	{Pa}
p_{op}	<i>pressão operacional da turbina</i>	[bar]
p_{res}	<i>pressão operacional do reservatório metálico</i>	[bar]
p_t	<i>pressão de trabalho (pressão do compressor)</i>	[bar]
p_{turb}	<i>pressão de trabalho da turbina</i>	[bar]
R	<i>constante universal dos gases</i>	$\frac{J}{mol \cdot K}$
rpm	<i>rotação por minuto, rotação síncrona projetada do gerador</i>	
ρ_{ent}	<i>massa específica de ar na entrada</i>	$\frac{kg}{m^3}$
t	<i>tempo</i>	[min]
T	<i>torque de acionamento do gerador</i>	[N.m]
t_{amb}	<i>temperatura ambiente</i>	[°C]
$t_{compressão}$	<i>tempo de duração do processo de compressão</i>	[s]
T_{C-i}	<i>temperatura do ar no estágio de compressão i</i>	[K]
$T_{C-(i-1)}$	<i>temperatura do ar no estágio de compressão $i - 1$</i>	[K]
$T_{C-sai-(i-1)}$	<i>temperatura de saída do ar comprimido no estágio $i - 1$</i>	[K]
T_{entra}	<i>temperatura de entrada do fluido de troca</i>	[K]
$T_{entra-frio}$	<i>temperatura de saída do fluido frio (água)</i>	[K]
T_{ent}	<i>temperatura de entrada no compressor</i>	[K]
$T_{fluido\ frio-(i-1)}$	<i>temperatura do fluido de refrigeração no estágio $i - 1$ (entrada)</i>	[K]
$T_{fluido\ quente-(i-1)}$	<i>temperatura do fluido quente no estágio $i-1$ (entrada ar em expansão)</i>	[K]
t_{inv}	<i>tempo de funcionamento diário</i>	[h]
$t_{produção}$	<i>tempo de duração do processo de expansão na turbina</i>	[s]
$T_{troc-sai}$	<i>temperatura de saída do fluido de troca</i>	[K]

T_{c-sai}	<i>temperatura de saída no compressor</i>	[K]
$T_{sai-hot}$	<i>temperatura de saída do fluido quente (ar)</i>	[K]
T_{st}	<i>temperatura inicial do ar no reservatório</i>	[K]
t_t	<i>temperatura de saída do ar comprimido do compressor</i>	[°C]
T_{t-i}	<i>temperatura do ar na turbina no estágio i</i>	[K]
$T_{t-(i-1)}$	<i>temperatura do ar na turbina no estágio $i - 1$</i>	[K]
$T_{t-sai-(i-1)}$	<i>temperatura de saída do ar da turbina no estágio $i - 1$</i>	[K]
u	<i>energia interna específica</i>	$\left[\frac{J}{kg}\right]$
V	<i>volume normal do reservatório metálico de ar comprimido</i>	[l]
\dot{W}	<i>potência</i>	[W]
\dot{W}_{cs}	<i>potência de compressão</i>	[W]
$\dot{W}_{turbina}$	<i>potência da turbina</i>	[W]
Z_{ent}	<i>parcela referente à pressão operacional de entrada</i>	[Pa]
Z_{sai}	<i>parcela referente à pressão operacional de saída</i>	[Pa]

SUMÁRIO

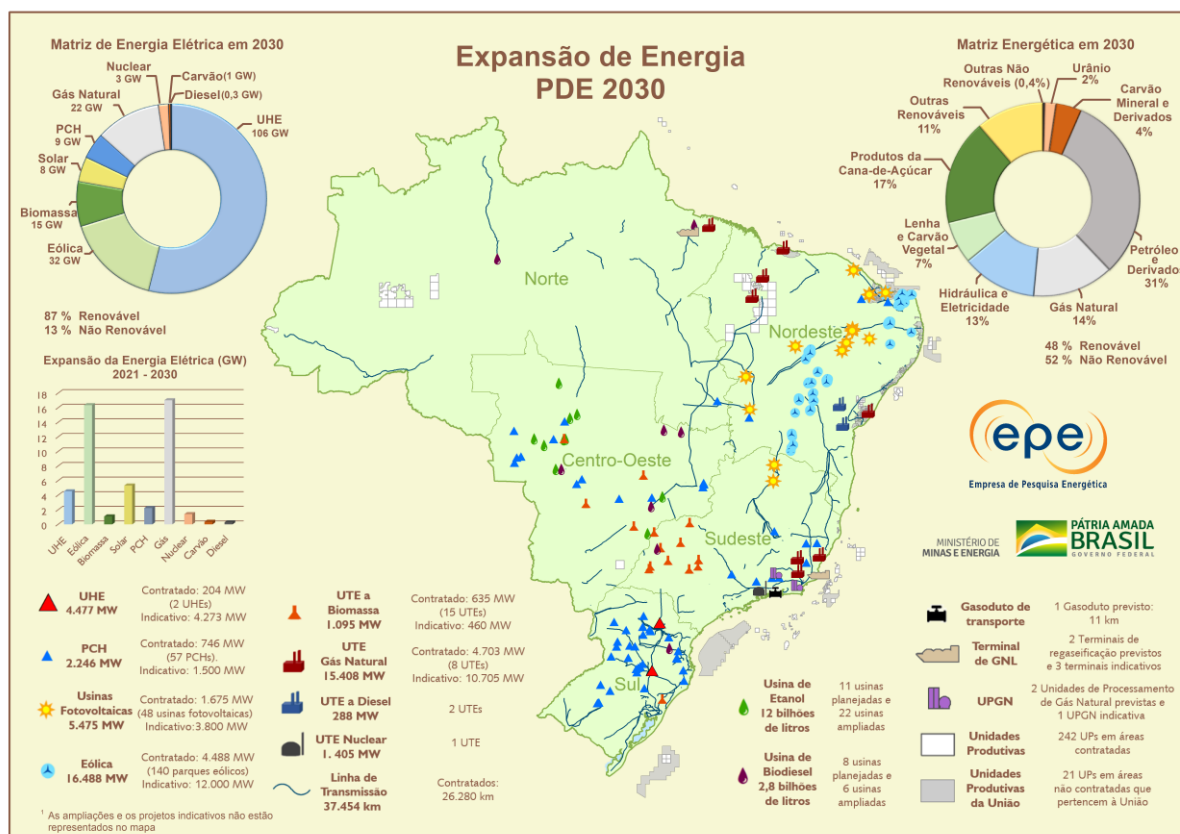
1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Motivação	25
1.2	Justificativa.....	28
1.3	Objetivos	28
1.3.1.	Objetivo principal	28
1.3.2.	Objetivos específicos.....	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1	Descrição geral dos sistemas CAES	29
2.2	Características gerais dos sistemas CAES no mundo	34
2.3	Equações fundamentais regentes	36
2.3.1	Análise do processo de compressão.....	37
2.3.2	Análise do processo de armazenamento de ar	38
2.3.3	Análise do processo de expansão em turbinas	40
2.3.4	Análise do processo de transferência de calor	41
2.4	Condições operacionais de um sistema A-CAES.....	42
2.5	Outros processos de CAES.....	43
3	METODOLOGIA	46
3.1	Etapas de projeto	46
3.2	Base de cálculo do sistema A-CAES	48
3.2.1	Características gerais.....	48
3.2.2	Determinação da insolação	50
3.2.3	Cálculo do torque necessário e potência de acionamento do gerador elétrico	51
3.2.4	Seleção da turbina de acionamento do gerador elétrico	52
3.2.5	Seleção do reservatório de ar comprimido	53
3.2.6	Tempo de carregamento do compressor.....	53
3.2.7	Tempo de descarregamento do reservatório (tempo de operação da turbina)	54
3.2.8	Cálculo do volume ideal do reservatório (em função do compressor)....	55

3.2.9	Conjunto de geração (turbina pneumática e gerador elétrico).....	56
3.2.10	Dados comparativos para seleção dos equipamentos	57
3.2.11	Conjunto fotovoltaico	61
3.3	Conclusões dos cálculos de projeto	64
3.4	Comparativo genérico com diversos sistemas de pequeno porte ..	65
3.5	Estimativa orçamentária para o sistema primário.....	68
3.6	Projeto implantado no LabMPEE-DAMEC (UTFPR) Ponta Grossa ..	69
3.6.1	Seleção dos painéis fotovoltaicos.....	69
3.6.2	Montagens eletromecânicas e construções civis.....	79
3.6.3	Características dos painéis fotovoltaicos instalados.....	82
3.6.4	Croqui pneumático do sistema A-CAES.....	84
3.6.5	Projeto do comando elétrico.....	88
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS PRELIMINARES E DISCUSSÕES	122
5	CONCLUSÕES	125
5.1	Sugestões de melhorias para trabalhos futuros	127
	REFERÊNCIAS.....	128

1 INTRODUÇÃO

A geração e o consumo de energia a nível mundial têm registrado crescimento acelerado, especialmente após a passagem do milênio. Em todo mundo, o setor de geração e distribuição de energia é um pilar do desenvolvimento nacional. Aqui, no Brasil, tem ministério próprio, orçamento trilionário (considerando-se os investimentos públicos e privados) e funciona ao mesmo tempo como termômetro e impulsionador da economia. Os investimentos no país são contabilizados pelo Ministério de Minas e Energia (MME), com apoio da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Esses dois órgãos governamentais elaboram estudos decenais. O último Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) foi lançado para investimentos até o fim de 2030 e nele há o mapa de distribuição energética elétrica brasileira, bem como são relacionados os investimentos já planejados para a próxima década (Figura 1).

Figura 1 - Plano decenal de expansão de energia elétrica: PDE 2030



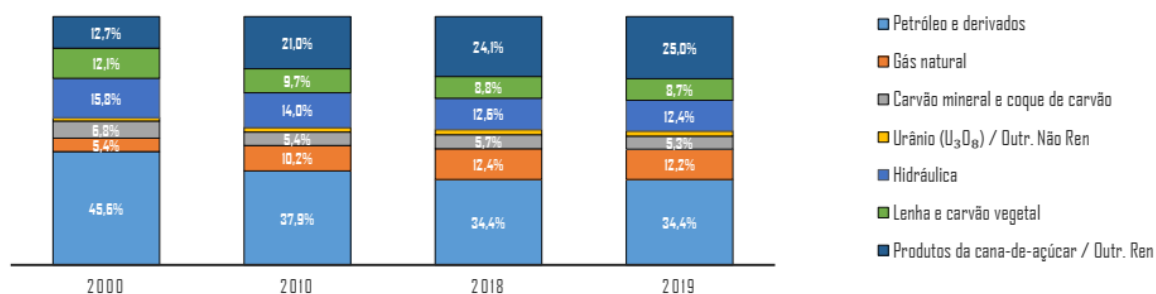
Fonte: EPE (2020)

Desse plano de investimentos (públicos e privados) destaca-se a expansão da matriz energética renovável. A evolução da fonte solar passou a ter contribuição de 1,2% (aumento de 51,5% na relação a 2022/2021) e a eólica passou a ter 2,3%

(aumento de 12,9% na relação a 2022/2021) em relação a matriz energética nacional total (renováveis ou não). Houve aumento da contribuição da energia hidráulica em 14% na relação a 2022/2021. Os investimentos para geração (central ou distribuída, públicos e privados) e de sistemas de distribuição somam R\$ 528 bilhões no período (SECIUK, 2022). Há maior concentração, nesse plano de investimentos, de energias eólicas e solares, na região nordeste brasileira. É importante ressaltar que a EPE considera energias renováveis também os resíduos do setor sucroalcooleiro, lixívia e biocombustíveis (produtos utilizados em termelétricas).

No Gráfico 1 pode ser observada a evolução das modalidades de geração de energia primária, dentro da matriz energética nacional. As energias renováveis tiveram substancial aumento, sendo que de 2013 a 2022, as energias renováveis passaram a ter participação de 47,4% na matriz energética (Gráfico 2). Considerando-se que o governo e as empresas públicas e privadas venham a investir massivamente nos combustíveis de origem fóssil e líquidos biocombustíveis (R\$ 2,72 trilhões até 2031 ou 85% total dos investimentos planejados para o decênio), haverá a evolução positiva da matriz energética renovável.

Gráfico 1 - Consumo energético por fonte



Fonte: EPE (2023)

Sabe-se que as energias provenientes de fontes eólicas e solares são naturalmente instáveis, tendo sua variação temporal dependendo da climatologia. Pode haver tanto excesso de ventos, como a diminuição da fonte energética, e até mesmo a parada total em questão de minutos. A fornecimento da energia solar depende de o tempo estar aberto, sem nuvens, da região em que se localiza a usina solar, da hora solar, entre outros fatores, não sendo produzida à noite obviamente.

Gráfico 2 - Participação percentual das energias renováveis na matriz energética brasileira entre 2013 e 2022



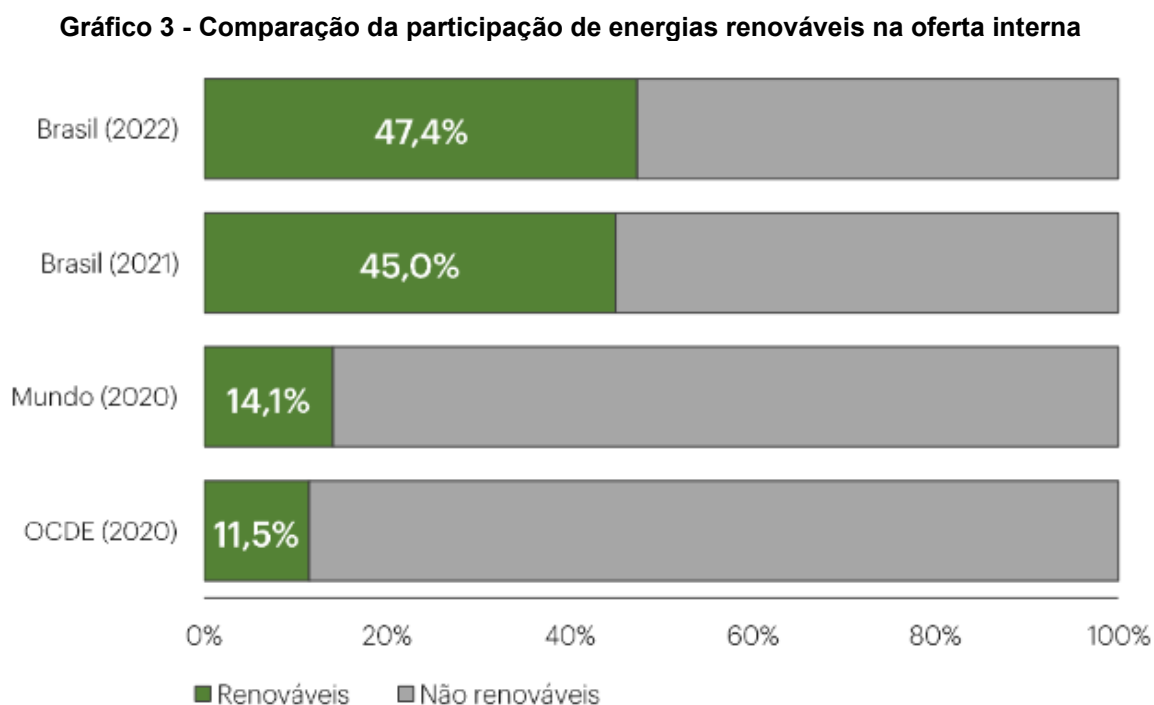
Fonte: EPE (2023)

Sendo assim, há pelos um desafio permanente no desenvolvimento humano: de se ter a disponibilização de meios energéticos imediatos para utilização no tempo exato da necessidade. Para essa finalidade de estabilização dos sistemas de produção com a distribuição e utilização, foram desenvolvidos novos aparatos para armazenamento de energia. Algumas dessas formas mais comuns de armazenagem não são tão próximas de uma orientação ecológica e todas possuem limitações de uso no seu tamanho físico e aplicação, podendo gerar resíduos sólidos, emissões, produtos perigosos, entre outras considerações.

No Brasil, o sistema de armazenagem através da energia potencial hidráulica de um rio é bastante utilizado por usinas hidrelétricas. No entanto, isso pode promover a inundação de áreas de mata, deslocamentos de pessoas e alterações de biomas. A execução de hidrelétricas sem lago de reservatório hidráulico tem apresentado inúmeros inconvenientes, como a dependência única e exclusivamente do nível do rio, tornando o sistema pouco confiável e gerando prejuízos financeiros em relação ao investimento realizado. Por outro lado, os sistemas de armazenagem através de energia química têm como vantagem o fato de serem bastante compactos em termo de energia, porém desvantajosamente limitados em quantidade total de fornecimento de energia, tamanho e ainda há problemas na geração de resíduos sólidos não recicláveis ou potencialmente perigosos para o meio ambiente. Destaca-se também a indicação da Organização das Nações Unidas (ONU) aos países para priorização de

utilização de energias renováveis e de geração distribuída de energia. Com essas orientações, provavelmente haverá em pouco tempo, diversos sistemas médios que necessitarão de estabilizadores de intermitências de energia, mantendo-se o fornecimento de energia elétrica de forma adequada tecnicamente.

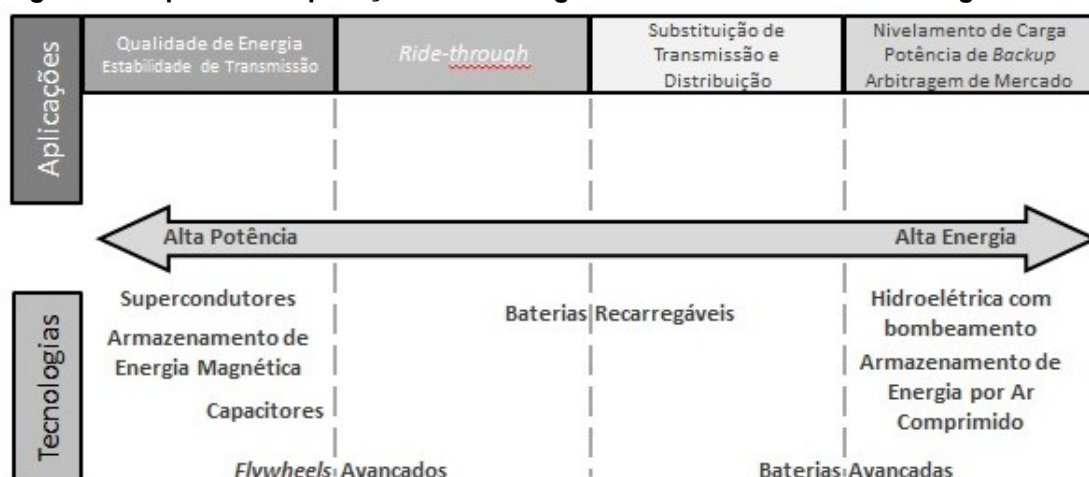
O Gráfico 3 ilustra a participação bastante importante das energias renováveis na oferta interna no Brasil e no mundo. Todas essas fontes energéticas necessitam de distribuição e controle, que podem ser aprimorados com reguladores operacionais, inclusive os sistemas de armazenamento potencial de ar comprimido, tecnologia ainda inédita na América Latina.



Fonte: EPE (2023)

A evolução tecnológica dos sistemas de armazenamento, controle e automação aplicados aos sistemas CAES, possibilitam estabilizar sistemas elétricos com a transferência de energia elétrica à rede, através dos sistemas de armazenamento e regeneração elétrica por acionamento via operador do sistema elétrico local. Aplicações tecnológicas foram elencadas na Figura 2, por Castellões (2016), dando ideia dimensional de aplicação em relação ao porte do sistema. Essas instabilidades mencionadas podem ocorrer em falta de ventos ou à noite nos sistemas fotovoltaicos de energia solar.

Figura 2 - Espectro de aplicações e tecnologias de armazenamento de energia elétrica

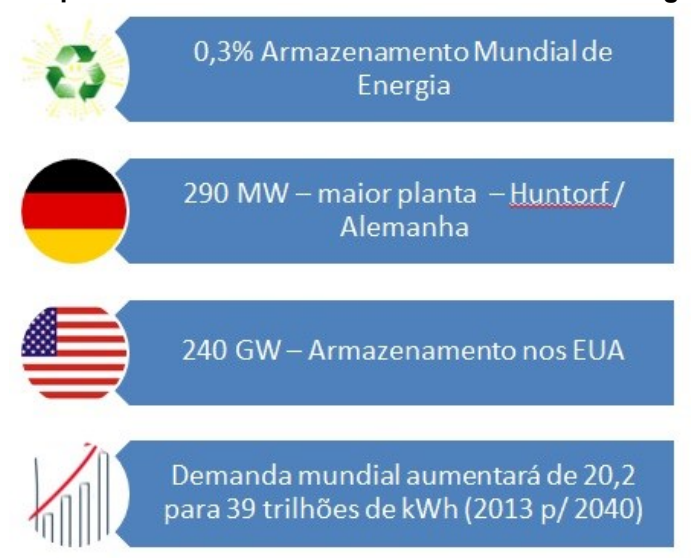


Fonte: Castellões (2016)

Com o aumento de produção de energia solar, que atingiu em 2022 a produção de 30,1 TWh e capacidade instalada de 24,45 GW, por exemplo, uma cidade de médio porte poderá ter incentivada a produção através de sistemas renováveis fotovoltaicos ou eólicos, para que possam ser utilizados durante o dia ou horário de produção e, com a instalação de plantas com mecanismos estabilizadores de produção, como armazenagem em grande reservatório de ar comprimido.

Nesse contexto, a Estocagem de Energia por Compressão de Ar Adiabática, do inglês, *Adiabatic Compressor Air Energy Storage (A-CAES)*, assunto tratado nesta Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, é uma evolução técnica eco ambiental de produção e armazenagem de energia visando uma forma mais prática para estabilização de intermitências ocasionadas na geração distribuída. Alguns números do armazenamento de energia podem ser apreciados na Figura 3, onde se observa que a maior planta de armazenamento de ar comprimido é a Huntorf. Nos EUA estão registrados 240 GW de armazenamento em diversas modalidades (*Flywheels*, bombeamento hidráulico, baterias, hidros, ar comprimido, magnéticos, entre outros). Observa-se que há pouco investimento em relação ao armazenamento de energia atualmente. Trata-se de um contexto multidisciplinar envolvendo inclusive a Engenharia Térmica, passível de ser melhor estudada e aplicada. Um dos fatores que justifica a melhoria da apreciação científica do armazenamento de energia é a previsão da diminuição da participação da matriz hidrelétrica no Brasil. Outro fator é o posicionamento atual da sociedade brasileira em relação aos problemas ambientais e também causados às pessoas vizinhas às barragens, gerados pela inundação de grandes áreas para formação das barragens.

Figura 3 - Principais números do armazenamento e uso de energia em relação



Fonte: Aatoria própria (2023)

Além disso, as questões energéticas mundiais são complexas e muitos países preferem o uso de combustíveis fósseis, carvão mineral e gás natural para aplicar em termoelétricas, ou as fontes que tenham melhor disponibilidade. Trata-se de assunto estratégico para cada país, e conforme se dá atenção a esse tema, percebe-se que os países que apresentam melhores resultados econômicos possuem forte atuação nesse setor. A falta ou a ineficiência no setor energético gera problemas macroeconômicos nos países que não tratam adequadamente o tema.

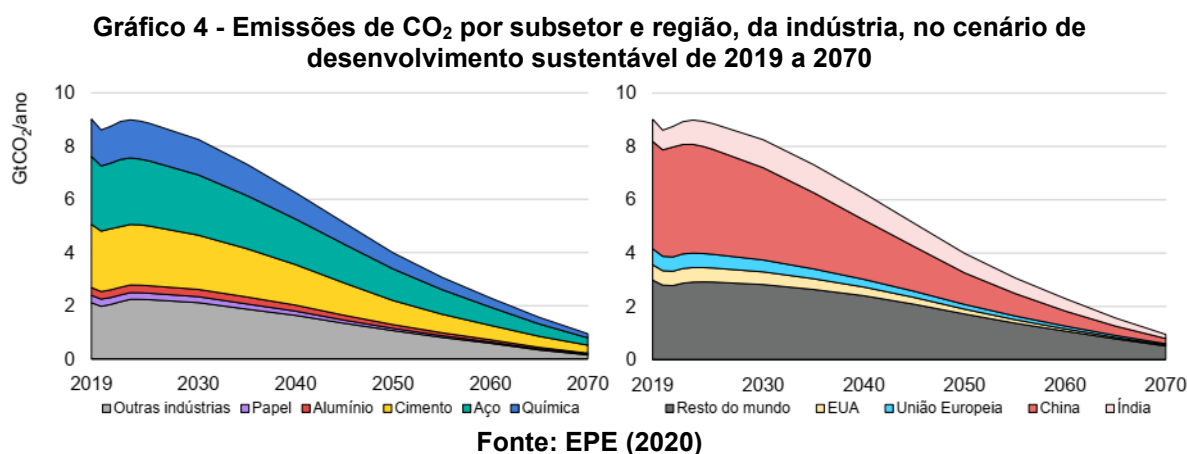
1.1 Motivação

De acordo com as tendências apontadas pela sociedade brasileira, quaisquer organismos federativos poderão utilizar os investimentos para a produção, armazenamento e distribuição de energia verde.

Empregando um Sistema A-CAES (*Adiabatic Compressor Air Energy Storage*) = Estocagem de Energia por Compressão de Ar Adiabática, qualquer cidade, por exemplo, poderá produzir e gerenciar boa parte da sua energia, sem necessitar de inundação de áreas e nem arcar com custos de transmissão e distribuição de energia provenientes dos confins brasileiros, mesmo estando integrada ao Anel Elétrico Nacional. Após a armazenagem, a energia elétrica do reservatório ou vaso de pressão, que está sob a forma potencial de pressão de ar comprimido poderá ser transformada em energia elétrica em turbinas pneumáticas de alto rendimento, em uma planta térmica de compressão e transmissão. A formação do Regulador

Pneumático Operacional - RPO pode ser seccionada em diversos vasos de pressão ou em um grande vaso único de pressão subterrâneo, denominado de reservatório. Dessa forma, poder-se-á estudar novos formatos mais compactos de turbinas aerodinâmicas impulsionadas por ar comprimido, com a vantagem de não emissão ainda de gases poluentes ou residuais de combustão.

O Gráfico 4 ilustra o compromisso dos principais países poluentes atmosféricos até 2070, embora esse caminho não esteja sendo seguido adequadamente. De qualquer forma existe o compromisso de diminuição da emissão de CO₂ para atmosfera até 2070 (EPE, 2020).



Como proposta tecnológica, o Sistema A-CAES e também o Sistema CAES, poderão ser estendidos a dois tipos de porte, médio e micro. Os sistemas de médio porte poderão abastecer boa parte de uma cidade em regime noturno por exemplo. Enquanto que os sistemas de micro porte poderão atender locais onde não possa haver perdas ou interrupções de fornecimento de energia, como por exemplo, hospitais, data centers, entre outros. Também poderão ser utilizados em horários de pico, diminuindo os custos com energia elétrica e com combustíveis utilizados em geradores térmicos que tem a finalidade de cobrir esses horários de alto valor financeiro da energia elétrica.

Há de se reconhecer que existem fatores limitantes, como por exemplo, que a produção deverá ser superior ao consumo, de tal forma que haja estocagem para uso no período adequado. Outro fator é que deverá haver um projeto de Engenharia Eletromecânica para cada planta a ser implantada, com cálculos que poderão ser padronizados no futuro, bem como espera-se uma evolução na produção de energia através do escoamento de ar pressurizado em novos formatos de turbina. Nestes

projetos futuros serão analisados dados econômico-financeiros em relação aos diversos sistemas horosazonais disponíveis, permitindo que se faça a análise de viabilidade dos empreendimentos CAES e A-CAES.

Diante desse panorama energético e da possibilidade de aplicações de armazenamento de energia como diferencial tecnológico futuro, propõe-se nessa Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica estudar um sistema de armazenamento por energia potencial por ar comprimido, suas variações, bem como projetar, construir e apresentar os resultados preliminares de um modelo experimental em escala laboratorial para discussões das aplicações no setor energético renovável, onde haja instabilidade ou descontinuidade na geração de energia. Também este sistema poderá ampliar a integração nacional do sistema elétrico, utilizando energias fotovoltaica ou eólica das regiões em que esta produção elétrica tem maior eficiência.

Dessa forma, valendo-se dos princípios da Engenharia, estudados em suas diversas disciplinas, desenvolveram-se bases para entendimento dos processos de armazenamento de energia por compressão de ar.

A construção de um modelo em escala laboratorial visa demonstrar a aplicabilidade prática do tema, bem como relacionar os resultados experimentais preliminares com os previstos teoricamente e os industriais já instalados. Dentre os benefícios da utilização do Sistema CAES está uma forte redução de combustível utilizado, comparando-se com as termoelétricas de regeneração exclusiva à combustão. Essa redução pode chegar a 67% em relação à uma termoelétrica de mesma potência e construção similar. Isso reduz em muitas toneladas à emissão de CO₂ para atmosfera (SIEMENS, 2020).

Nos sistemas adiabáticos (A-CAES), sem uso de combustível no final do processo de expansão, cumpre-se a quase totalidade de objetivos ecológicos e ambientais requeridos pela sociedade contemporânea, cujos principais são a redução de emissão de CO₂ e a redução de áreas inundadas por barragens. A validação do tema, como alternativa energética, regulatória, se faz através da concepção, projeto, construção de um modelo, que poderá ser estudado também posteriormente a essa dissertação de mestrado, sob a forma de simulação numérica e sistemas de controle automatizados.

1.2 Justificativa

Relatados os investimentos planejados para o próximo decênio em energias renováveis (R\$ 528 bilhões previstos no Brasil até 2031), e observando-se a crescente participação da sociedade nas decisões de projetos envolvendo energia, principalmente em relação às questões sócio ambientais, torna-se necessário estudar meios de estabilização, armazenamento e regulação de energia elétrica. Energia é tema que têm inúmeros compêndios de estudos e, por ser item de infraestrutura e termômetro de desenvolvimento, é um assunto praticamente inesgotável, que seguirá cada vez mais forte e presente nas literaturas e planejamentos nacionais e internacionais dos países, como questão estratégica a ser desenvolvida de acordo com as características regionais. Por isso, parte-se do pressuposto que deverão estar consolidados os conceitos que levam à produção em escala industrial e nacional da energia, bem como seu uso racional.

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo principal

Analisar o funcionamento operacional preliminar de um Sistema Adiabático de Armazenamento de Energia por Ar Comprimido (A-CAES, do inglês, *Adiabatic Compressor Air Energy Storage*), projetado e construído em escala laboratorial.

1.3.2. Objetivos específicos

- Projetar um Sistema A-CAES para operação em laboratório com base em informação disponível na literatura;
- Construir e instalar um Sistema A-CAES, incluindo os seus sistemas de controle;
- Realizar testes preliminares de funcionamento de um Sistema A-CAES.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

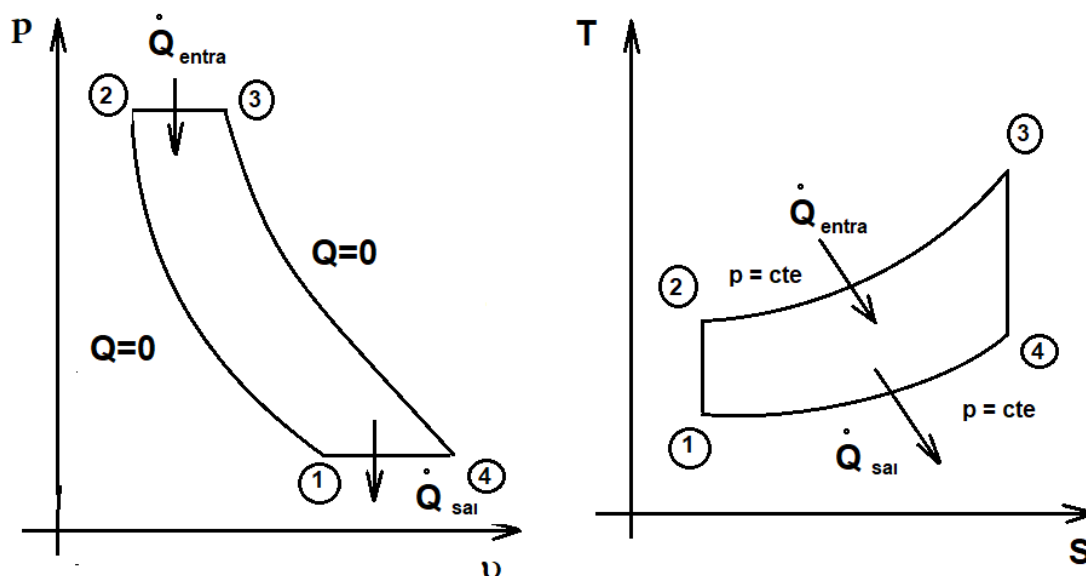
Este capítulo descreve as principais características dos Sistemas CAES e A-CAES, trazendo também alguns dados operacionais de plantas existentes no mundo. Adicionalmente, apresentam-se detalhes de parâmetros de projeto e dimensionamento desses sistemas de armazenamento de energia.

2.1 Descrição geral dos sistemas CAES

Nos processos de compressão de ar, ocorre inicialmente a admissão de ar, depois um processo isoentrópico de compressão, uma expansão livre com abertura da válvula de alta, retornando ao processo de admissão com fechamento da válvula de alta e abertura da válvula de admissão. Esse processo isoentrópico será explicado posteriormente com as definições das equações fundamentais regentes. Os processos de expansão livre para o reservatório e para a turbina também serão detalhados um pouco mais adiante. O processo isoentrópico é uma condição idealizada para aproximar o ciclo dos números reais, porém tem aplicação prática devido às condições de precisão de avaliação numérica da transformação.

Como a revisão bibliográfica baseia-se também em dados experimentais obtidos das usinas de Huntorf na Alemanha e de McIntosh nos Estados Unidos, onde os ciclos utilizam combustível fóssil no último estágio de expansão, apresenta-se uma breve explicação do Ciclo *Brayton* para turbinas (Figura 4). As turbinas a gás que operam no Ciclo *Brayton* são motores de combustão interna, porém diferentes dos Ciclos Otto e Diesel. Existe um fluxo constante de ar no motor e um fluxo constante de produtos da combustão do motor. A compressão é, obviamente, realizada por um compressor rotativo (não alternativo) e a combustão ocorre em uma câmara, de modo que possa utilizar diversos tipos de combustível. Os produtos da combustão que estão em altas temperatura e pressão, fluem para a turbina a gás e essa transforma calor em energia mecânica e elétrica. Nesse caso, para análise do Ciclo *Brayton* aplica-se a Primeira Lei da Termodinâmica para volumes de controle (compressor, câmara de combustão e turbina). Importante ressaltar que o Ciclo *Brayton* é um ciclo ideal, mas que serve para aproximações do ciclo real ocorrido nas turbinas a gás.

Figura 4 - Diagramas pressão x volume específico ($p-v$) e temperatura x entropia ($T-s$) para Ciclo *Brayton* ideal



Fonte: Adaptado de Kroos e Potter (2016)

Outros detalhes presentes nos Sistemas CAES são os fluxos convectivos no interior do reservatório e as transferências de calor pelas paredes. Também são analisados métodos para aproveitar o calor gerado nos processos de compressão para um reservatório térmico. O reservatório troca calor durante a expansão nas turbinas, diminuindo a entalpia do fluido. Obviamente, o aproveitamento não será total, e boa parte do ar comprimido será disseminado para atmosfera, gerando calor e som.

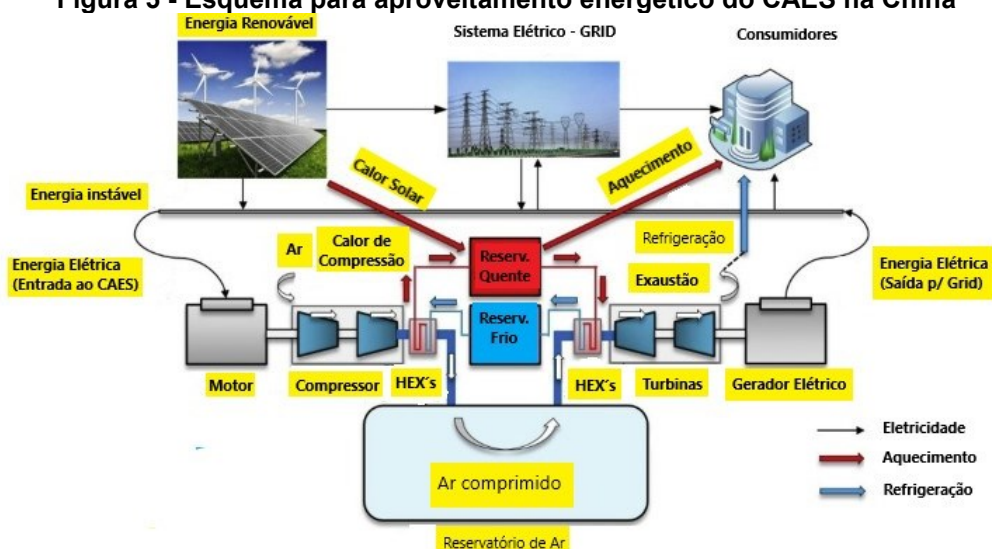
Em relação à fonte de energia solar do Sistema CAES, cabe lembrar que a densidade energética média proveniente do sol, fora da nossa atmosfera, é conhecida como constante solar e vale 1.335W/m^2 . Essa densidade está constantemente disponível no lado iluminado da Terra, gerando $11,86\text{MWh/m}^2$ anuais de energia (MOREIRA, 2017).

Historicamente as células fotovoltaicas foram inventadas em 1931 nos Estados Unidos. Em 1955, um terminal de telecomunicações foi acionado por energia fotovoltaica. Em 1957, os satélites operavam com energia solar fotovoltaica. Em 1981, uma central elétrica solar de 250kW operava nos Estados Unidos. Em 1999, a energia fotovoltaica solar ultrapassava a produção de 1000MW (MOREIRA, 2017).

Para um Sistema CAES com energia renovável proveniente de células fotovoltaicas, como ilustrado na Figura 5, haverá necessidade de um projeto elétrico de força, comando e controle. Isso poderá ser resolvido através do dimensionamento

de cabos, inversor, CLP, contactores de potência e proteções. A energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos necessita passar por um inversor solar e ser transformada em corrente alternada, para alimentação do motor do compressor. Quando houver energia suficiente para a partida do motor, o inversor acionará diretamente o motor ou as cargas a ele ligadas, fazendo que sejam alimentadas eletricamente de forma adequada. O CLP funcionará como acionamento e controle. Para controle pneumático de pequeno porte, tem-se sensores de pressão e vazão, bem como sensores de rotação da turbina e temperatura do ar na saída do vaso de pressão. Esses dados são absorvidos pelo CLP, bem como o tempo de funcionamento do compressor em carregamento e o tempo de descarga, observado pelo fechamento on/off do sensor de pressão que fará a válvula eletrônica trabalhar entre a máxima e a mínima pressão de acionamento da turbina e conseqüentemente do alternador elétrico. Ainda assim, são feitos controles mecânicos de pressão e lubrificação do ar, através do lubrifil (lubrificador, regulador de pressão automático e filtro), onde é selecionada a pressão de trabalho. A válvula proporcional derivativa fará o controle da vazão, através de um algoritmo PID para controle da vazão operacional conjuntamente com a pressão operacional da turbina, visando o máximo aproveitamento energético do sistema. O acionamento do alternador é feito por acoplamento direto elástico na turbina. Outros controles se encontram no compressor como a pressão de acionamento do motor elétrico e a pressão de armazenamento no reservatório acoplado, neste caso, função exercida por um simples pressostato de contato mecânico. Um componente que pode inviabilizar o sistema pneumático é o silenciador na saída da turbina, onde o ar de exaustão será liberado. Esse componente provoca a necessidade de pressões superiores à de trabalho da turbina (sistema aberto), gerando perdas de carga importantes e que afetam diretamente a velocidade angular da turbina, podendo inclusive, nem atingir a rotação síncrona prevista para o alternador.

Figura 5 - Esquema para aproveitamento energético do CAES na China

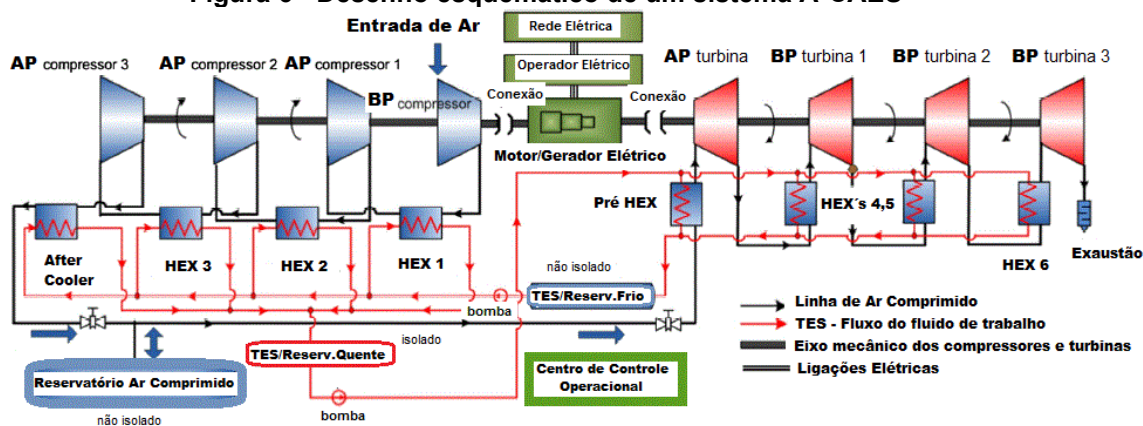


Fonte: Adaptado de Tong et al. (2021)

Os novos sistemas propostos encontrados na literatura, fazem a consideração da possibilidade de recuperação de calor gerado durante o ciclo de compressão e utilização no processo de expansão das turbinas. Essa energia térmica gerada pelo processo de compressão é captada por um sistema composto por trocadores de calor (HEXS, do inglês *heat exchangers*), armazenada em uma planta térmica (TES, do inglês *Thermal Energy Storage*) composta basicamente por um reservatório quente e outro frio, bombas e trocadores de calor. O ar é armazenado a baixa temperatura e expande a alta temperatura, e quando esta expansão ocorre, o ar continua recebendo calor dos trocadores de calor (proveniente do reservatório quente do TES). Normalmente o fluido de trabalho selecionado da planta térmica TES é a água, que apresenta um alto calor específico, podendo conduzir e armazenar grande quantidade de energia em espaço menor.

A composição do sistema CAES com a planta térmica TES é chamado de sistema A-CAES (Armazenamento de Energia por Compressão de Ar de forma Adiabática ou do inglês, *Adiabatic Compressor Air Energy Storage*). Isto quer dizer que somente o fluido de trabalho do TES e o ar estão envolvidos no sistema. Não há queima de combustível (gás natural ou GLP ou outro) envolvido no sistema. A Figura 6 mostra um Sistema A-CAES de forma esquemática.

Figura 6 - Desenho esquemático de um sistema A-CAES



Fonte: Adaptado de Xing *et al.* (2015)

O funcionamento básico do sistema ilustrado esquematicamente na Figura 6 é que a rede elétrica instável é conectada ao A-CAES e gerida pelo Operador Elétrico, que controla a entrada e saída de energia para o chamado grid on, ou seja, o operador é quem verifica e gera as demandas necessárias ao A-CAES, operando de forma automática ou não. No sistema de compressão, o ar é admitido a pressão atmosférica pelo Compressor 1 (BP - baixa pressão) e é impelido para outros compressores em série (Compressores 2 e 3) denominados boosters (AP - alta pressão) que elevam a pressão do ar a aproximadamente 72kgf/cm^2 , conduzindo o ar até o reservatório de ar comprimido. Durante os estágios de compressão a entalpia, a pressão e a temperatura do ar vão se elevando. Em cada estágio há um trocador de calor (HEX) que refrigera o ar, recebendo calor do mesmo e transmitindo ao fluido de trabalho (geralmente água). A temperatura máxima de saída no último estágio de compressão do ar é de aproximadamente 163°C e a mínima após o último estágio de expansão (turbinas) é de aproximadamente 101°C . A temperatura da água nos reservatórios quente e frio são de 109°C e 69°C , respectivamente. A água armazenada no reservatório quente provém dos trocadores de calor e *aftercoolers* instalados nos estágios de compressão. Esse reservatório fica isolado visando evitar perdas térmicas. Esse fluido quente é bombeado para as turbinas onde há trocadores de calor em cada estágio de expansão do ar comprimido, com a finalidade de aumentar a temperatura do ar, entregando calor ao mesmo e retornando ao reservatório frio. A variação média de temperatura entre os reservatórios frio e quente é de 40°C . O reservatório frio não é isolado, bem como o reservatório de ar comprimido. A finalidade do TES (sistema composto por trocadores de calor, reservatórios frio e quente e sistema de bombeamento) é evitar a perda de calor através do reservatório de ar

comprimido. De forma lógica, esse reservatório poderia ficar a alta temperatura se não houvesse o sistema de trocas térmicas, porém, devido às dimensões e irregularidades nas paredes do mesmo é praticamente inviável acontecer o isolamento térmico do mesmo (cavernas e grandes dimensões). Além do que ocasionaria problemas operacionais aos compressores. Assim, esse calor que seria perdido, é recuperado e aproveitado no aumento da entalpia na saída do sistema de expansão (turbinas).

Finalmente, o ar comprimido, a alta pressão e temperatura, é conduzido até cavernas subterrâneas, geralmente com geologia salina, onde fica armazenado com pressões aproximadas de 72 bar. A temperatura das cavernas é em torno de 50°C. Não é possível dimensionar teoricamente as perdas de calor nas cavernas, por sua geometria irregular e também porque não hermeticamente estanque. Quando o operador abre a válvula de descarga das cavernas, o ar quente e pressurizado é enviado para as turbinas, finalizando o ciclo.

2.2 Características gerais dos sistemas CAES no mundo

Até o momento, existem duas plantas CAES em operação no mundo; uma planta de 110MW em McIntosh, no estado do Alabama, nos Estados Unidos da América, comissionada em 1991 e uma planta de 290MW em Huntorf, Alemanha, construída em 1978. Ambas as plantas armazenam ar no subsolo em cavernas de sal produzidas pela mineração de solução.

É improvável de se fazer um estudo relacionado ao CAES sem elencar a Planta Térmica alemã de Huntorf. Concebida para regularizar a rede de energia elétrica proveniente de usinas eólicas localizadas no norte daquele país, foi a primeira a entrar em operação comercial, no ano de 1978. Trata-se de um sistema onde se armazena energia pneumática potencial em cavernas salinas subterrâneas, com volume aproximado de 310.000m³. Como mencionado, essa planta tem 290MW de potência e opera segundo um ciclo diário. A Tabela 1 apresenta os principais números referentes a essa planta. Esse sistema CAES vem sendo aperfeiçoado desde a sua inauguração e os resultados simulados relatados na literatura dão conta de um rendimento térmico global de aproximadamente 42%.

A Planta Térmica de Huntorf tem funcionado segundo um ciclo de 8 horas de compressão e 2 horas de descarregamento (produção elétrica), pois os seus funcionários avaliaram que o ciclo diário apresentaria melhores resultados. A

temperatura de entrada no ciclo de compressão é a ambiente local e foi adotada como 20°C.

Este rendimento considera a energia elétrica na entrada e a energia gerada pela planta no ciclo de descompressão.

Tabela 1 - Especificações básicas do CAES: Planta Térmica Huntorf/Alemanha

ITEM	DENOMINAÇÃO	VALOR	UNIDADE
Compressores - linhas de baixa e alta pressão (conexão em série)			
01	Vazão Mássica de Ar dos Compressores	108	kg/s
02	Potência de todos compressores	60	MW
03	Temperatura de saída do ar do pós-resfriador	50	°C
04	Máxima de Ar de saída do pós-resfriador	72	kgf/cm ²
Cavernas-dois reservatórios subterrâneos			
05	Volume total (físico) das cavernas (aproximado)	310.000	m ³
06	Faixa de temperatura das paredes das cavernas	40 a 50	°C
07	Pressão operacional dos reservatórios	43 a 66	kgf/cm ²
08	Pressão máxima admissível	70	kgf/cm ²
09	Queda de pressão operacional	10 a 15	kgf/cm ²
Turbinas - linhas de alta e baixa pressão (conexão em série)			
10	Vazão Mássica de Gás nas Turbinas	417	kg/s
11	Potência de todas as turbinas	290	MW
12	Pressão de entrada na turbina de alta pressão	43	kgf/cm ²
13	Pressão de entrada na turbina de baixa pressão	8 a 11	kgf/cm ²
14	Razão temporal de carga/descarga de todo sistema	4	-

Fonte: Adaptado de Xing et al. (2015)

A planta fabril CAES McIntosh de 110 MW no Alabama/EUA, construída em 1991 opera de forma suave, econômica e com 98,9% de confiabilidade. Além disso, uma instalação CAES pode ser projetada para longa duração do armazenamento estendendo-se a vários dias, garantindo a disponibilidade de um recurso energético estável, utilizável quando for necessário para atender a demanda do sistema, bem como para fornecer serviços de apoio, como regulação, reservas cíclicas e otimização da transmissão. Em um ciclo típico CAES em McIntosh, há três estágios de expansão, o ar comprimido, ao sair da caverna de armazenamento, é primeiro pré-aquecido pela exaustão do expensor em um calor residual trocador ou recuperador. Um disparo suplementar no recuperador aumenta ainda mais a temperatura do ar, chegando a 1000°F (537°C) antes de fluir através do expensor de primeiro estágio para produzir 20MW. O escapamento do primeiro estágio é então reaquecido no recuperador e encaminhado para o segundo estágio expensor, produzindo 32MW adicionais. Ao sair

do expansor de segundo estágio, o ar é direcionado para um sistema de combustor de baixo NOx (óxidos de nitrogênio), onde a queima direta aumenta a temperatura antes de entrar no terceiro e expansor de estágio final. O expansor de terceiro estágio gera um adicional de 108MW, resultando em uma potência nominal de 160MW. O uso da recuperação, aliado com altas pressões de armazenamento de ar (até 3.000psi, aproximadamente 206bar), resulta em excelente eficiência energética para o bloco de potência CAES. Em comparação à combustão convencional de ciclo simples de turbinas ou picos que muitas concessionárias usam para fornecer resposta de carga, o bloco de energia McIntosh consome cerca de 67% menos combustível, produzindo assim muito menos CO₂ por kW-h. Além disso, uma turbina a gás padrão opera em conjunto com uma seção de compressor. Uma instalação CAES dissocia as funções de expansão e compressão, resultando em uma curva de taxa de transferência de calor superior durante a operação em carga parcial. Isso permite a operação econômica da unidade em carga mínima, tão baixo quanto 10% da nominal, enquanto espera para ser acionada pelo operador da rede (BAILIE, 2021). A Tabela 2 apresenta os principais números referentes a essa planta.

Tabela 2 - Especificações básicas do CAES: Planta Térmica McIntosh/EUA			
ITEM	DENOMINAÇÃO	VALOR	UNIDADE
Compressores - linhas de baixa e alta pressão (conexão em série)			
01	Vazão Mássica de Ar dos Compressores	89,5	kg/s
02	Potência de todos compressores	49	MW
03	Máxima de Ar de saída do after cooler	75	kgf/cm ²
Cavernas-reservatório subterrâneo			
04	Volume total (físico) das cavernas (aproximado)	540.000	m ³
05	Pressão operacional dos reservatórios	45 a 75	kgf/cm ²
Turbinas - linhas de alta e baixa pressão (conexão em série)			
06	Vazão Mássica de Gás nas Turbinas	154,7	kg/s
07	Potência de todas as turbinas	110	MW

Fonte: Adaptado de Bailie (2021)

2.3 Equações fundamentais regentes

Valendo-se de uma boa aproximação real, as equações de transformação de estado podem ser aplicadas a processos isoentrópicos (compressão e expansão) e com isso simplifica-se a modelagem analítica das equações regentes no Sistema A-CAES.

a) Conservação da massa:

O princípio da conservação da massa expressa o balanço global das massas que entram e saem de um volume de controle e pode ser escrito por:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sai}, \quad (1)$$

sendo que, $\partial m/\partial t$ é a taxa de variação mássica, \dot{m}_{ent} é a vazão mássica que entra em cada estágio e \dot{m}_{sai} é a vazão mássica que sai em cada estágio.

b) Conservação da energia:

O princípio da conservação da energia, Primeira Lei da Termodinâmica, para um volume de controle pode ser expresso por:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_{ent} \left(h_{ent} + \frac{c_{ent}^2}{2} + z_{ent}g \right) = \dot{m}_{sai} \left(h_{sai} + \frac{c_{sai}^2}{2} + z_{sai}g \right), \quad (2)$$

sendo que, \dot{Q} é a taxa de transferência de calor, \dot{W} é a potência, \dot{m}_{ent} é a vazão mássica que entra em cada estágio, h_{ent} é a entalpia do fluido na entrada, c_{ent} é a velocidade do fluido na entrada, z_{ent} é o referencial de altura na entrada, g é a força gravitacional, \dot{m}_{sai} é a vazão mássica que sai em cada estágio, h_{sai} é a entalpia do fluido na saída, c_{sai} é a velocidade do fluido na saída e z_{sai} é o referencial de altura na saída.

2.3.1 Análise do processo de compressão

O sistema A-CAES, mostrado esquematicamente na Figura 9, é composto por quatro compressores, sendo um de baixa pressão e os demais de alta pressão. Toda massa que entra pode ser considerada a mesma que sai, pois as perdas podem ser consideradas desprezíveis em relação ao porte do sistema. Também, as transformações podem ser consideradas isoentrópicas como boa aproximação, dispensando-se a politropia. A potência de compressão pode ser calculada usando-se as Equações (3) e (4), definindo-se pela modelagem de gás ideal:

$$\dot{W}_{cs} = \dot{m}_{cs} \Delta h = \dot{m}_{cs} \int_{T_{entcs}}^{T_{sai cs}} c_p dT, \quad (3)$$

sendo que \dot{W}_{cs} , é a potência de compressão, \dot{m}_{cs} é a vazão mássica de ar que entra no compressor, Δh é a variação de entalpia no compressor, $T_{ent_{cs}}$ é a temperatura de entrada do ar no compressor, $T_{sai_{cs}}$ é a temperatura de saída do ar no compressor e c_p o calor específico a pressão constante.

$$\Delta h = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R T_{ent_{cs}} \left[\left(\frac{p_{sai_{cs}}}{p_{ent_{cs}}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} - 1 \right], \quad (4)$$

sendo que γ é a relação entre os calores específicos a pressão constante e a volume constante do ar, R é a constante universal dos gases, $p_{ent_{cs}}$ é a pressão de entrada do ar no compressor e $p_{sai_{cs}}$ é a pressão de saída do ar no compressor.

A modelagem analítica proposta nas Equações (3) e (4) é possibilitada pela consideração de que a pressão e a entalpia de saída são dadas segundo o ciclo ideal com processo isentrópico.

2.3.2 Análise do processo de armazenamento de ar

O processo de armazenamento de ar pode ser considerado a volume constante, dispensando-se inicialmente os fluxos convectivos induzidos (pela entrada ou saída do ar em velocidades diferentes) e naturais (diferenças interiores de massa específica) ocorridos no interior do reservatório de ar comprimido.

Considerando a realidade de engenharia e a economicidade do processo, o reservatório é estudado de tal forma que seja não adiabático, porém tenta-se reduzir as perdas através da transferência de calor pelas paredes aproximando-se a temperatura de entrada do ar comprimido do ambiente interno do reservatório de armazenamento de ar.

Os balanços de massa no reservatório de ar podem ser expressos por:

$$\frac{\partial \rho_{st}}{\partial t} = \frac{\dot{m}_{ent_{st}}}{V_{st}} = \frac{\rho_{ent} c_{ent_{st}} A_{ent_{st}}}{V_{st}} \text{ nos processos de pressurização, } (5)$$

$$\frac{\partial \rho_{st}}{\partial t} = -\frac{\dot{m}_{sai_{st}}}{V_{st}} = \frac{\rho_{sai} c_{sai_{st}} A_{sai_{st}}}{V_{st}} \text{ nos processos de despressurização, (6)}$$

sendo que $\partial \rho_{st} / \partial t$ é taxa de variação de massa específica no armazenamento, $\dot{m}_{ent_{st}}$ é a vazão mássica na entrada do armazenamento, V_{st} é o volume de armazenamento, ρ_{ent} é a massa específica na entrada do armazenamento, $c_{ent_{st}}$ é a velocidade na entrada do armazenamento, $A_{ent_{st}}$ é a área na entrada do armazenamento, $\dot{m}_{sai_{st}}$ é a vazão mássica na saída do armazenamento, ρ_{sai} é a massa específica na saída do armazenamento, $c_{sai_{st}}$ é a velocidade na saída do armazenamento e $A_{sai_{st}}$ é a área na saída do armazenamento.

Da Primeira Lei da Termodinâmica, resulta que a variação da energia interna pode ser expressa por:

$$\frac{\partial(mu)}{\partial t} = \dot{m}_{ent_{st}} h_{ent_{st}} - \dot{m}_{sai_{st}} h_{sai_{st}} - \frac{\lambda A_{parede_{st}} (T_{st} - T_{parede_{st}})}{L_{parede}}, \quad (7)$$

sendo que $\partial(mu) / \partial t$ é a taxa de variação da energia interna, m é a massa de armazenamento, u é a energia interna específica, $h_{ent_{st}}$ é a entalpia na entrada do armazenamento, $h_{sai_{st}}$ é a entalpia na saída do armazenamento, λ é a condutividade térmica do reservatório de armazenamento, $A_{parede_{st}}$ é a área da parede do reservatório de armazenamento, T_{st} é a temperatura inicial do ar armazenado, $T_{parede_{st}}$ é a temperatura da parede do reservatório de armazenamento e L_{parede} é a espessura da parede do reservatório de armazenamento.

O diferencial da temperatura de armazenamento do ar, ΔT_{st} , pode ser obtido por:

$$\Delta T_{st} = \frac{1}{m_{arm} R} (M_{ar} \dot{P}_{arm} V_{st} - \dot{m}_{arm} P_{arm} T_{st}), \quad (8)$$

sendo que, m_{ar} é a massa armazenada, R é a constante universal dos gases, M_{ar} é a massa molar do ar, \dot{P}_{arm} é o diferencial de pressão no reservatório em relação ao

tempo, V_{st} é o volume de armazenamento, \dot{m}_{arm} é o fluxo de massa no reservatório, P_{arm} é a pressão no interior do reservatório e T_{st} é a temperatura inicial do ar armazenado no reservatório.

O princípio da conservação da massa para o reservatório pode ser expresso por:

$$\dot{m}_{ent} t_{pressurização} = \dot{m}_{sai} t_{despressurização} \quad (9)$$

sendo que, \dot{m}_{ent} e \dot{m}_{sai} são as vazões mássicas que entram e saem, respectivamente, do reservatório e $t_{pressurização}$ é o tempo de duração do processo de pressurização e $t_{despressurização}$ é o tempo de duração do processo de expansão na turbina.

É importante destacar que a Equação (9) se refere ao princípio de conservação da massa em relação ao fluxo mássico, sendo que, normalmente, os compressores e turbinas comerciais tratam do fluxo volumétrico à pressão atmosférica. Por isso é preciso tratar com volumes normais de operação e corrigi-los para a pressão operacional do sistema de compressão ou expansão. Ressalta-se que a expressão *FAD*, do inglês *Free Air Discharging*, se refere ao fluxo volumétrico de ar à pressão atmosférica para o interior da câmara de compressão. Volume normal é uma denominação comum em pneumática, indicando o volume de ar à pressão atmosférica e à temperatura 0°C.

2.3.3 Análise do processo de expansão em turbinas

Geralmente são utilizadas turbinas multi-estagiadas em um Sistema A-CAES e cada uma delas consiste de um grupo de alta e baixa pressão (em estágios) - vide Figura 9. A turbina aproveita a energia pneumática armazenada, convertendo-se em potência mecânica, de acordo com a expressão:

$$\dot{W}_{turb} = \eta_{turb} \dot{m}_{turb} (h_{ent,turb} - h_{sai,turb}) \quad (10)$$

sendo que, \dot{W}_{turb} é a potência da turbina, η_{turb} é o rendimento isoentrópico da turbina, \dot{m}_{turb} é a vazão mássica de ar na turbina, $h_{ent,turb}$ é a entalpia do ar na entrada da turbina e $h_{sai,turb}$ é a entalpia do ar na saída da turbina (como expansão isoentrópica).

No sistema, o aumento de temperatura com a passagem de ar pelos trocadores de calor que detém o fluido proveniente do reservatório quente aumenta a temperatura, e por consequência, a entalpia de entrada em cada estágio da turbina.

2.3.4 Análise do processo de transferência de calor

Quando o Sistema CAES não faz uso de combustíveis (A-CAES), todo o aproveitamento energético advém de um bom projeto de transferência de calor nos TES (Armazenamento de Energia Térmica, do inglês, *Thermal Energy Storage*). O TES, mais que um simples vaso de energia térmica, é composto também pelos trocadores de calor, *aftercoolers*, bombas, serpentinas (*splitters* e *headers* ou *mixers*), reservatórios quente e frio e sistemas de isolamento.

A análise dos processos de transferência de calor nos Sistemas A-CAES pode ser feita mediante a verificação dos seguintes parâmetros:

a) Efetividade

$$\varepsilon = \frac{\widehat{C}_{quente} (T_{ent_{quente}} - T_{sai_{quente}})}{\widehat{C}_{min} (T_{sai_{quente}} - T_{ent_{frio}})} = \frac{\widehat{C}_{frio} (T_{sai_{frio}} - T_{ent_{frio}})}{\widehat{C}_{min} (T_{sai_{quente}} - T_{ent_{frio}})}, \quad (11)$$

sendo que, ε é a efetividade do trocador de calor, \widehat{C}_{quente} e \widehat{C}_{frio} são as capacidades volumétricas dos fluidos quente e frio, respectivamente, $T_{ent_{quente}}$ e $T_{ent_{frio}}$ são as temperaturas de entrada dos fluidos quente e frio, respectivamente, $T_{sai_{quente}}$ e $T_{sai_{frio}}$ são as temperaturas de saída dos fluidos quente e frio, respectivamente, e \widehat{C}_{min} é a menor capacidade térmica entre os fluidos quente e frio.

b) Processo de Compressão (por estágio i) do Compressor

$$T_{cs_i} = T_{cs_{(i-1)}} - \varepsilon \frac{\widehat{C}_{min}}{\widehat{C}_{ar}} \left[T_{sai_{cs_{(i-1)}}} - T_{ent_{frio_{(i-1)}}} \right], \quad (12)$$

sendo que, T_{cs_i} e $T_{cs_{(i-1)}}$ são as temperaturas do ar nos estágios de compressão i e $(i - 1)$, respectivamente, i é o identificador genérico de estágios ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), ε é a efetividade do trocador de calor, \widehat{C}_{min} é a menor capacidade térmica entre os

fluidos quente e frio, \widehat{C}_{ar} é a capacidade térmica do ar, $T_{saics(i-1)}$ é a temperatura de saída do ar comprimido no estágio $(i-1)$ e $T_{entfrio(i-1)}$ é a temperatura de entrada do fluido frio no estágio $(i-1)$.

c) Processo de Expansão (por estágio i) da Turbina

$$T_{turb_i} = T_{turb_{(i-1)}} - \varepsilon \frac{\widehat{C}_{min}}{\widehat{C}_{ar}} \left[T_{entquente(i-1)} - T_{sai_turb_{(i-1)}} \right], \quad (13)$$

sendo que, T_{turb_i} e $T_{turb_{(i-1)}}$ são as temperaturas do ar na turbina nos estágios i e $(i-1)$, respectivamente, i é o identificador genérico de estágios $(i = 1, 2, 3, \dots, n)$, ε é a efetividade do trocador de calor, \widehat{C}_{min} é a menor capacidade térmica entre os fluidos quente e frio, \widehat{C}_{ar} é a capacidade térmica do ar, $T_{entquente(i-1)}$ é a temperatura de entrada do fluido quente no estágio $(i-1)$ e $T_{sai_turb_{(i-1)}}$ é a temperatura de saída do ar da turbina no estágio $(i-1)$.

2.4 Condições operacionais de um sistema A-CAES

A Tabela 3 relaciona itens usados para modelar um Sistema A-CAES através da análise dos processos anteriormente proposto.

Tabela 3 - Parâmetros básicos de um modelo A-CAES otimizado analiticamente

(continua)

ITEM	DENOMINAÇÃO	VALOR	UNIDADE
Compressores - linhas de baixa e alta pressão (conexão em série)			
01	Temperatura Ambiente	20	°C
02	Pressão Atmosférica	1,013	bar
03	Razão de compressão/produção	2	
04	Número de estágio de compressão e expansão	4	

Tabela 3 - Parâmetros básicos de um modelo A-CAES otimizado analiticamente

(conclusão)

Compressores (alta e baixa pressão) - estágios em série			
05	Potência Total	16,6	MW
06	Vazão Mássica de Ar	33	kg/s
07	Eficiência da Transformação Isoentrópica	80%	
08	Razão de compressão de cada estágio	2,75	

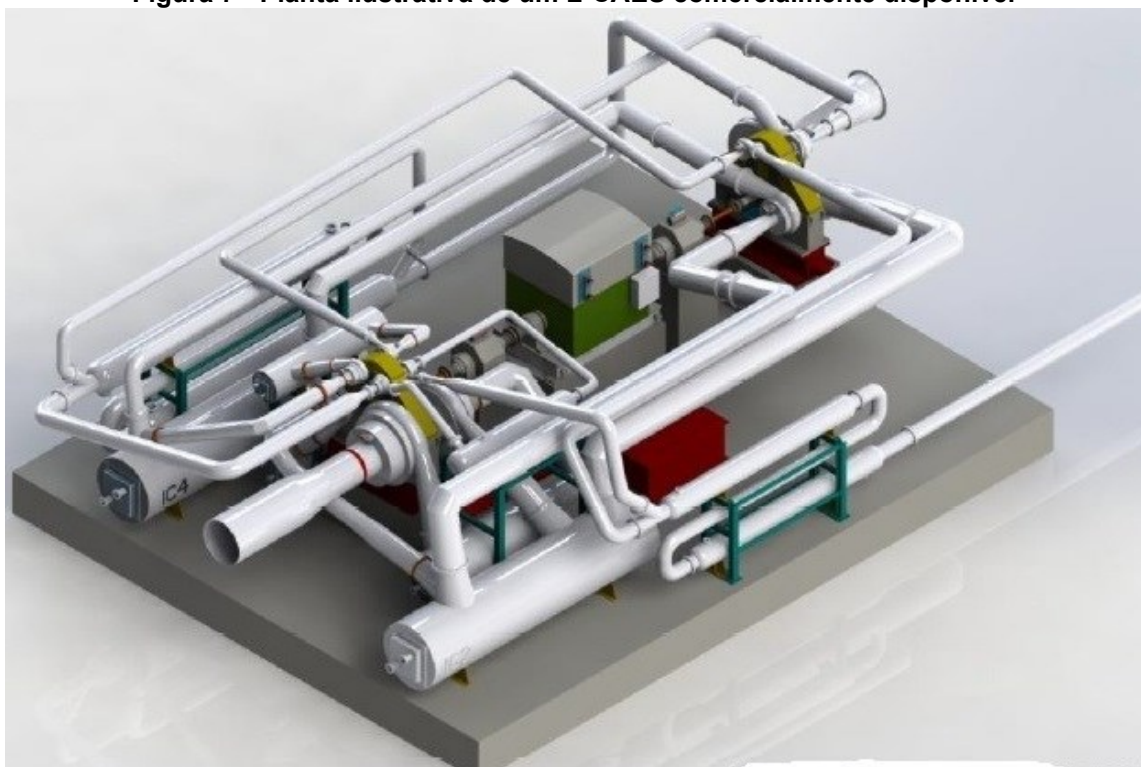
Turbinas - linhas de alta e baixa pressão (conexão em série)			
09	Potência de todas as turbinas	17,8	MW
10	Vazão Mássica de Gás nas Turbinas	66	kg/s
11	Eficiência Isoentrópica da Expansão	80%	
12	Razão de expansão de cada estágio	2,55	
TES / Reservatório de Ar Comprimido			
13	Coefficiente de Transferência de Calor de cada Trocador	80	kW/K
14	Fluxo de água no Trocador no processo de compressão	11	kg/s
15	Fluxo de água no Trocador no processo de expansão	22	kg/s
16	Perda de Carga no Trocador de Calor (AR)	1,5%	
17	Temperatura de parede do reservatório	50	°C
18	Pressão Operacional Máxima	55	bar

Fonte: Adaptado de Xing et al. (2015)

2.5 Outros processos de CAES

O Armazenamento de Energia por Ar Comprimido, CAES (do inglês, *Compressed Air Energy Storage*), possui vários processos, inclusive com plantas térmicas de combustão a gás natural ou a combustíveis liquefeitos. Existe também o processo a baixíssimas temperaturas, em que o embarque tecnológico aumenta com o conseqüente incremento do rendimento global do sistema. Atualmente, laboratórios comerciais como o FraunhoferTM afirmam ter rendimento em torno de 70% com o L-CAES (*Liquified CAES*) mostrado esquematicamente na Figura 7.

Figura 7 - Planta ilustrativa de um L-CAES comercialmente disponível

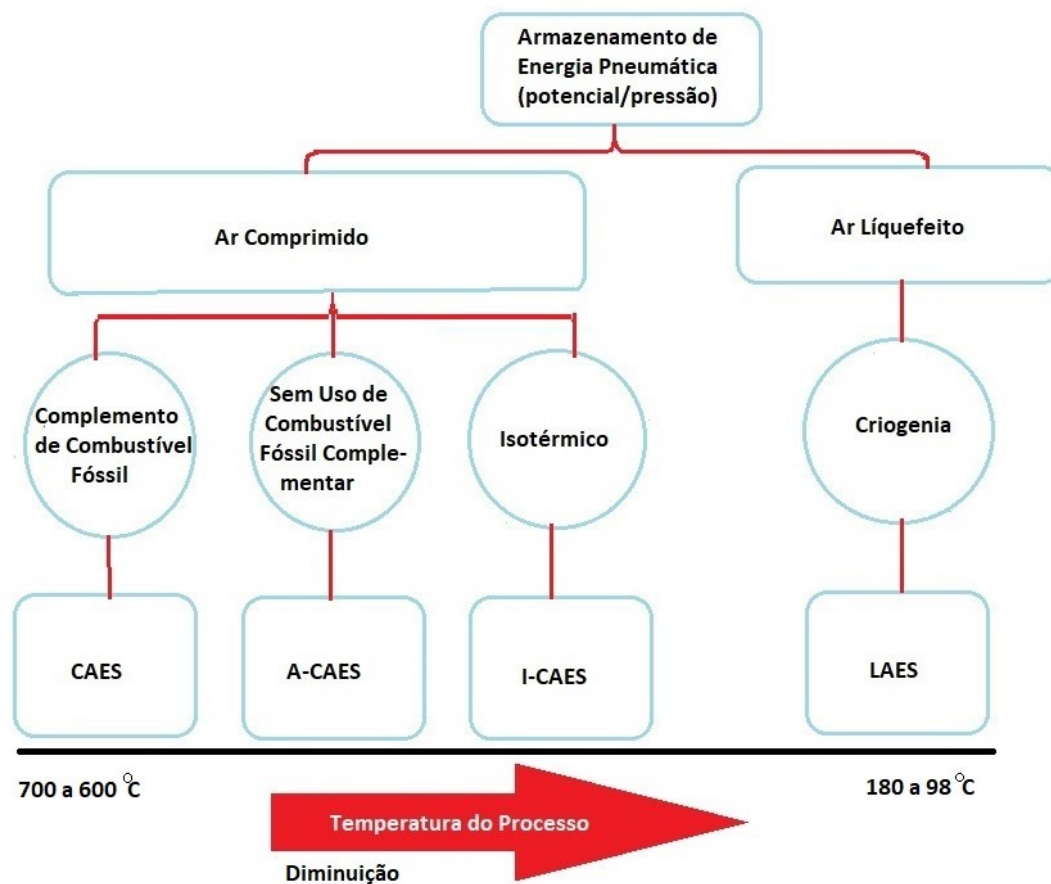


Fonte: Budt (2013)

As pressões do L-CAES ou LAES situam-se na ordem de 150kgf/cm^2 (projetadas), sendo bastante altas e requerendo reservatórios especiais, bem como equipamentos em geral. De acordo com Budt (2013), um sistema LAES poderia atingir a rendimentos da ordem de 64% a 86% aproximadamente, em condição laboratorial.

A Figura 8 relaciona os principais tipos de tecnologias CAES, desde aqueles processos que possuem queima de combustível no último estágio expensor, e cujo objetivo principal é o aumento da entalpia no último expensor, até os que apresentam a redução do consumo de combustível em termoeletricidade (geralmente gás natural) (caso das Plantas Térmicas Huntorf e McIntosh). Há ainda os que envolvem processos adiabáticos, onde somente a energia potencial do ar comprimido é utilizada. Essa é a vertente do projeto e construção do modelo relacionados com a presente Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.

Figura 8 - Resumo de tecnologias CAES comercialmente disponíveis



Fonte: Adaptado de Budt (2013)

As pressões utilizadas nos Sistemas CAES, A-CAES e I-CAES são classificadas como médias pressões operacionais e, são da ordem de 70kgf/cm². A diferença do Sistema I-CAES para os Sistemas CAES e A-CAES, é que as compressões são consideradas isotérmicas e esse sistema possui um acoplamento de um Regulador Hidro-Operacional (RHO) onde há uma interface de líquido e ar comprimido. Um compressor isotérmico (está em contato permanente com reservatório frio) que não use combustível, aumenta a densidade de energia aproveitada (LI, 2021). No sistema L-CAES, que possui alta pressão operacional, da ordem de 150kgf/cm², o ar se liquefaz.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve o procedimento para o dimensionamento e o projeto primário de um Sistema A-CAES, bem como os detalhes referentes à sua construção em escala laboratorial, cujo diagrama esquemático do sistema pretendido e suas características são melhor detalhadas no item 3.2. Esse sistema foi instalado no Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética (LabMPEE) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) do Programa de Pós-Graduação Multicampi em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Ponta Grossa.

3.1 Etapas de projeto

Para o projeto básico, foi necessário elaborar planilhas contendo a modelagem dos processos envolvidos, fundamentada nas equações da Termodinâmica, Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos. Essas planilhas são elementos auxiliares do projeto básico, que conta ainda com seleção de equipamentos comercialmente disponíveis a custo acessível (dentro do orçamento previsto), desenhos e esquemas de funcionamento.

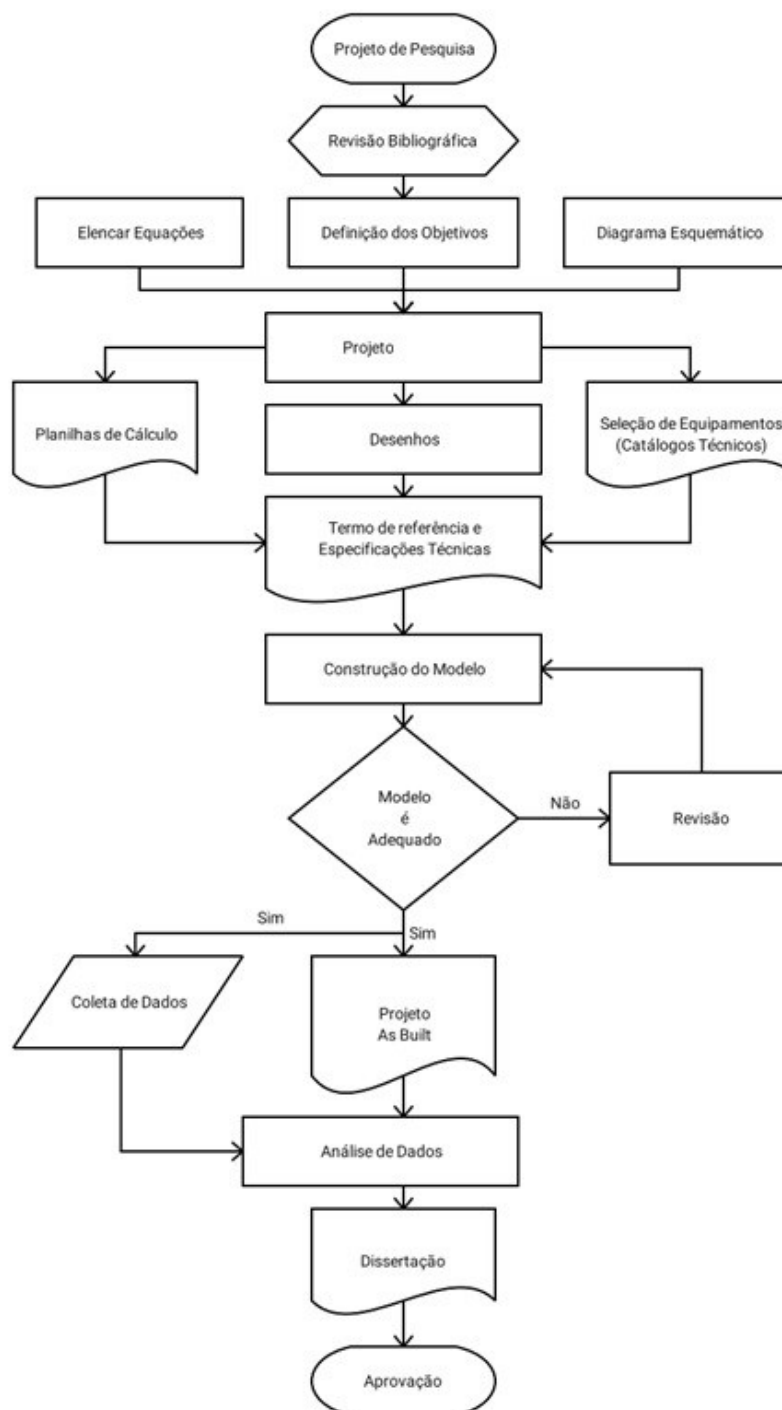
Após a finalização do projeto básico, foi dado início à construção do modelo experimental em escala reduzida laboratorial, sendo elaborados os documentos para aquisição de equipamentos, tais como especificações, desenhos executivos, croquis, planilhas de cálculos e memoriais descritivo e de cálculo, para constituir um termo de referência licitável ou passível de compra direta, para instalação efetiva do Sistema A-CAES. Esse termo de referência contém todas as informações necessárias para construção do modelo experimental. Durante a execução procedeu-se a fiscalização e adequações dos projetos básicos e termo de referência para consolidar a exequibilidade e a viabilidade do sistema proposto.

Executada a construção do modelo experimental, com todos seus componentes mínimos necessários, procedeu-se coleta de dados, bem como à armazenagem em planilhas de cálculos e, posterior análise desses dados experimentais preliminares. Os resultados obtidos podem ser compatíveis com as plantas comerciais existentes ou não, sendo isto, uma das diversas incertezas de projeto, pois trata-se de execução inédita na América Latina. Pelo pioneirismo,

provavelmente muitas melhorias podem ser propostas após a finalização dessa fase dos objetivos específicos.

A Figura 9 ilustra as principais etapas da metodologia empregada para desenvolvimento deste projeto de um Sistema A-CAES.

Figura 9 - Metodologia proposta para o estudo experimental



Fonte: Autoria própria (2023)

Com a construção da bancada, disponibiliza-se os projetos de automação (diagrama de blocos), projeto de comando elétrico, projeto mecânico sob a forma de croqui. Nessa etapa a metodologia passa a ser experimental. Tem-se a descrição do aparato tecnológico em escala laboratorial, os projetos implantados das bancadas de teste, descrição do funcionamento, execução dos testes (com a variáveis já definidas), modificações executadas e planilha orçamentária real em moeda nacional.

3.2 Base de cálculo do sistema A-CAES

O presente item apresenta a metodologia de cálculo fundamental para um Sistema A-CAES em escala laboratorial, visando à construção de uma bancada experimental para análise nessa Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.

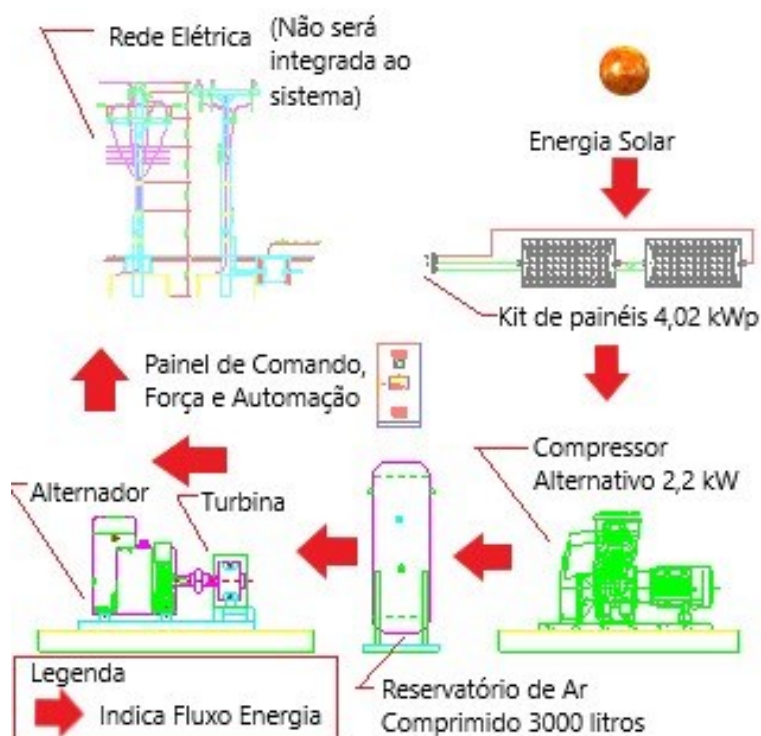
3.2.1 Características gerais

O projeto de Armazenamento de Energia através de Ar Comprimido visa o máximo rendimento global para uma bancada experimental a ser instalada na edificação do Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética (LabMPEE) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) vinculado ao Programa de Pós-Graduação Multicampi em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Ponta Grossa.

O início do dimensionamento do Sistema A-CAES pretendido, ilustrado esquematicamente na Figura 10, se dá pelo estabelecimento da escala dos dados operacionais. Sabe-se pelos dados operacionais das plantas industriais existentes no mundo, que a escala de armazenamento está em torno de 300.000m^3 de ar comprimido à pressão operacional da ordem de 72kgf/cm^2 , vazões mássicas de 108kg/s de ar nos compressores e potência de 60MW de compressão.

Para se obter uma escala laboratorial, foi pensado um microssistema (em relação às plantas industriais existentes), isto é, volume de armazenamento em torno de $0,3\text{m}^3$ a $3,0\text{m}^3$ de ar comprimido. As pressões operacionais foram estabelecidas pela seleção da escala comercialmente disponível, ou seja, de 7kgf/cm^2 a 30kgf/cm^2 de ar comprimido. As vazões mássicas operacionais são derivadas e obtidas pelas equações fundamentais, que estão apresentadas no Capítulo 2.

Figura 10 - Resumo de equipamentos projetados no Sistema A-CAES



Fonte: Autoria própria (2023)

Desta forma, inicia-se o processo de estabelecimento de escala de equipamentos, pelo cálculo da variação da entalpia, dada pela Equação (4) e obtendo-se a potência do compressor pela Equação (3). A vazão mássica da Equação (3) foi estimada em função da escala de armazenamento de ar comprimido, considerando-se um volume inicial de 3m^3 e o tempo de pressurização e despressurização do reservatório, obtido pela equação fundamental da Conservação da Massa, Equação (9), e pela potência e torque de acionamento do alternador, Equações (14) e (15). O rendimento isoentrópico considerado foi de 80% para a aplicação da Equação (10).

Feito isso, foram obtidas as configurações desejadas iniciais para projeto e construção do Sistema A-CAES, sendo que esses cálculos são usados como base para seleção de equipamentos existentes com disponibilidade comercial. Com isso, um resumo com os equipamentos para configuração do projeto básico, ilustrados esquematicamente na Figura 13, pode ser expresso por:

- 1 compressor Atlas Copco™ LT 3-10, 10bar, 5,5L/s e 2,2kW
- 1 motor de palhetas (turbina) Kazi™ KZA750, 7,5HP, 80L/s e 17N.m
- 1 alternador (gerador) elétrico Bambozzi™, 4kVA, 6p, $\cos\phi=0,85$, $\eta=63\%$ e 1800RPM;

- 1 reservatório de ar comprimido, 10bar, 3000L, na posição vertical
- 1 kit de painéis 4,02kW-p com inversor 220V, trifásico, 4,5 a 8,0 horas por dia
- 1 quadro (painel) de comando, força e automação
- Potência Geral Instalada: 3,2kW elétricos
- Tempo de Ciclo: 1h08min
- Número de Ciclos Diários: 3 a 4 ciclos

3.2.2 Determinação da insolação

Os cálculos para insolação foram realizados para a cidade de Ponta Grossa, no estado do Paraná, Brasil, considerando-se a altitude de 956m em relação ao nível do mar, as condições de temperatura máxima de 33,3°C, latitude de 25°5'40" Sul e longitude de 50°9'48" Oeste. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Insolação máxima para a latitude e longitude consideradas (anual) em hora solar às 14h

Insolação no mês de dezembro	[W/m²]
Normal	678
Norte	70
Noroeste	417
Nordeste	417
Oeste	434
Sul	38
Sudoeste	221
Sudeste	221
Leste	434

Fonte: Carrier (1991)

Conforme posicionamento dos painéis solares sobre o telhado e alinhamento predial do LabMPEE-DAMEC (UTFPR) campus Ponta Grossa, a insolação considerada para projeto foi a incidente na Face Normal (insolação diretamente sobre o telhado do prédio), com ângulo de inclinação dos painéis solares a 30° Sudoeste. Em consequência dessa orientação e inclinação, do azimute e da altura solar (função das coordenadas, da altitude e da hora), um fator percentual de redução de 15% foi utilizado sobre a insolação normal (CARRIER, 1991).

3.2.3 Cálculo do torque necessário e potência de acionamento do gerador elétrico

O gerador elétrico selecionado é de fabricação nacional, marca Bambozzi™, de pequeno porte, de tal forma que exija um sistema de armazenamento e geração de ar comprimido menor possível. O equipamento selecionado é utilizado em grupos moto geradores à diesel, de fácil acoplamento (elástico ou com flange pré-fabricada), de modo a facilitar o acoplamento na turbina de ar comprimido, e possui as seguintes características gerais:

- Alternador Síncrono Bambozzi™, 6 pontas, trifásico, 60Hz, 4 pólos e 1800RPM;
- Potência Nominal / Potência Tabelada: 4,0kVA ;
- Momento de Inércia: 0,10 kgf.m²;
- Massa do Alternador: 42kg;
- Rendimento: 85%;
- Ligação em Triângulo: 220V.

Nesse projeto o Sistema A-CAES não fará uso de sistema de combustão, apenas sistema por pressurização pneumática. Com isso, o torque deve ser o mais próximo do conjugado de partida do gerador.

A potência de acionamento, *Pot*, que é potência necessária a ser fornecida para o alternador para girar na rotação síncrona, foi obtida utilizando-se da seguinte expressão:

$$Pot = \frac{kVA \cos \varphi}{\eta} = \frac{4(0,80)}{0,75} = 4,27kW = 5,72HP, (14)$$

O torque de acionamento, Torque, que faz o giro inicial do rotor do alternador, foi obtido através da expressão a seguir:

$$Torque = \frac{Pot \cdot 9549,29}{RPM} = \frac{4,27(9549,29)}{1800} = 16,98N.m = 1,70kgf.m, (15)$$

3.2.4 Seleção da turbina de acionamento do gerador elétrico

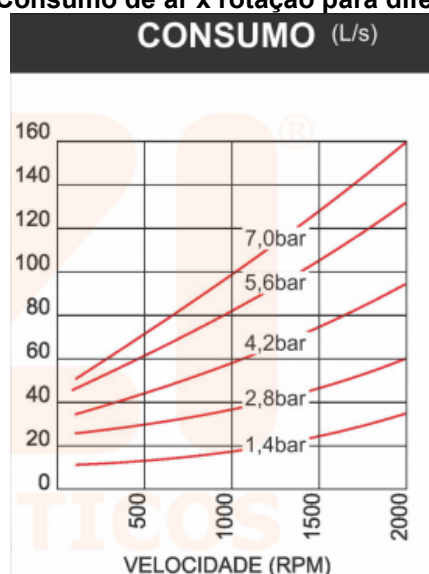
Foram selecionados motores pneumáticos comercialmente disponíveis, sem envolver combustão. Para a turbina pneumática da empresa Kazi™, modelo KZA750™, de 7,5HP, através do Gráfico 5, considerando rotação de 1800RPM e torque de acionamento de aproximadamente 17N.m, a pressão operacional necessária é de aproximadamente 4bar na entrada da turbina. O consumo de ar resultante é de 80L/s na turbina conforme ilustrado na Gráfico 6.

Gráfico 5 - Torque de acionamento no motor pneumático x rotação para diferentes pressões



Fonte: Kazi (2023)

Gráfico 6 - Consumo de ar x rotação para diferentes pressões



Fonte: Kazi (2023)

3.2.5 Seleção do reservatório de ar comprimido

Para seleção do reservatório de ar comprimido, foi preciso uma simulação do consumo do compressor, pressão operacional do reservatório, consumo de ar pela turbina, tempo de carregamento e descarregamento e isto está integrado com o melhor rendimento. Como antecipado, o rendimento deve ficar próximo dos 38,5% com esse modelo de turbina, cujo consumo de ar é bastante grande. Provavelmente, um sistema com dois ou três estágios de descompressão, fluxo misto (semelhante à turbina a gás, tenha um melhor rendimento, mantendo o torque necessário para operação e partida do gerador). Os sistemas empregados comercialmente aplicam essa forma de descompressão, complementando-a com um ciclo final de combustão de gás natural para obter um rendimento na faixa de 54%.

Há dois fatores a considerar no cálculo apresentado pela empresa Atlas Copco™ para o reservatório de ar comprimido, visto que esse cálculo considera 4x o volume para reservação e seus compressores em um ciclo máximo a cada 30s. Desses fatores, observa-se que o volume do reservatório de ar comprimido do sistema fica superdimensionado, ou apresenta um erro de unidade para cálculo do volume (que provavelmente é metros cúbicos e não litros como apresentado). Outro fator a considerar é o *FAD*, que é a descarga livre de ar em L/s, ou seja, a pressão de 920 mbar (atmosférica ao nível de Ponta Grossa - PR), o que leva a considerar que o rendimento do compressor não é muito bom também. Para se obter a melhor relação de descarga de ar do reservatório para turbina e tempo de carregamento, bem como para estimar o rendimento global, foi necessário elaborar planilhas iterativas cujos resultados são apresentados nas Tabelas 5 a 10.

3.2.6 Tempo de carregamento do compressor

Os reservatórios de ar comprimido podem ser acoplados aos compressores ou ser estruturas independentes. Como os compressores alternativos possuem vazão mássica definida e a pressão operacional dos reservatórios é definida através de pressostatos de alta e baixa pressão, há um certo tempo para que o compressor encha o reservatório com ar com a pressão máxima estabelecida. Esse tempo é chamado tempo de carregamento do compressor, $t_{\text{carregamento}}$, e pode ser expresso em minutos por:

$$t_{\text{carregamento}} = \frac{V(p_t - p_{op})(T_t + 273,15)}{(1 - FS)p_{atm}(T_{amb} + 273,15)60FAD}, \quad (16)$$

sendo que, V é o volume do reservatório de ar comprimido em litros, p_t é a pressão de trabalho do compressor (nesse caso, 10bar), p_{op} é a pressão operacional (pressão de trabalho da turbina, nesse caso, 4bar), T_t é a temperatura de trabalho (temperatura aproximada de saída do ar comprimido do compressor) em °C, FS é o fator de serviço (nesse caso, 75%, ou seja, 0,75), p_{atm} é a pressão atmosférica em Ponta Grossa (nesse caso, 0,920bar), T_{amb} é a temperatura ambiente em °C e FAD é a descarga livre de ar em L/s.

Os cálculos são iterativos e devem ser simulados para obter o melhor rendimento, ou seja, o menor tempo de carregamento com o maior tempo de descarregamento (que faz girar a turbina e o gerador elétrico).

A Equação (16) é derivada do volume ideal de reservação. O que ocorre é que alguns fabricantes consideram o volume ideal de reservação como sendo o necessário para evitar oscilações na rede elétrica e perdas de pressão, ou seja, funcionamento como pulmão, sendo o sistema mantido ao mesmo tempo pelo compressor e pelo reservatório de ar comprimido. Diante do exposto, o tempo de carregamento pode ser melhor calculado melhor, pela expressão:

$$t_{\text{carregamento}} = \frac{V(p_t - p_{atm})}{60FAD}, \quad (17)$$

sendo que, V é o volume do reservatório de ar comprimido em litros, p_t é a pressão de trabalho do compressor (nesse caso, 10bar), p_{atm} é a pressão atmosférica em Ponta Grossa (nesse caso, 0,920bar) e FAD é a descarga livre de ar em L/s.

3.2.7 Tempo de descarregamento do reservatório (tempo de operação da turbina)

O tempo de descarregamento do reservatório de ar comprimido é o período transcorrido entre o alcance da pressão parametrizada superior do reservatório e a pressão inferior que será estabelecida na linha de alimentação da válvula proporcional. Esse decréscimo de pressão é causado pela liberação da vazão mássica de ar comprimido do reservatório para a linha pneumática que no final

passará pelas pás da turbina e sairá para atmosfera. Quando o reservatório atinge a pressão mínima, o pressostato aciona novamente o compressor. O tempo descarregamento, $t_{descarregamento}$, pode ser calculado por:

$$t_{descarregamento} = \frac{V(p_{res} - p_{op})}{60 c_{turb} p_{atm}}, \quad (18)$$

sendo que, V é o volume do reservatório de ar comprimido em litros, p_{res} é a pressão de trabalho do reservatório de ar comprimido (nesse caso, começa em 10bar e termina em 4bar), p_{op} é a pressão operacional (pressão de trabalho da turbina, nesse caso, 4bar), c_{turb} é o consumo da turbina em L/s e p_{atm} é a pressão atmosférica em Ponta Grossa (nesse caso, 0,920bar).

3.2.8 Cálculo do volume ideal do reservatório (em função do compressor)

Para cálculo do volume ideal do reservatório de ar comprimido, a fabricante de compressores Atlas Copco™ propõe a Equação (19). Esse volume compreende o melhor aproveitamento energético integrado diretamente com o compressor.

$$V = \frac{0,25 p_{atm} (T_{amb} + 273,15) FAD}{f_{máx} (p_t - p_{op}) (T_{op} + 273,15)}, \quad (19)$$

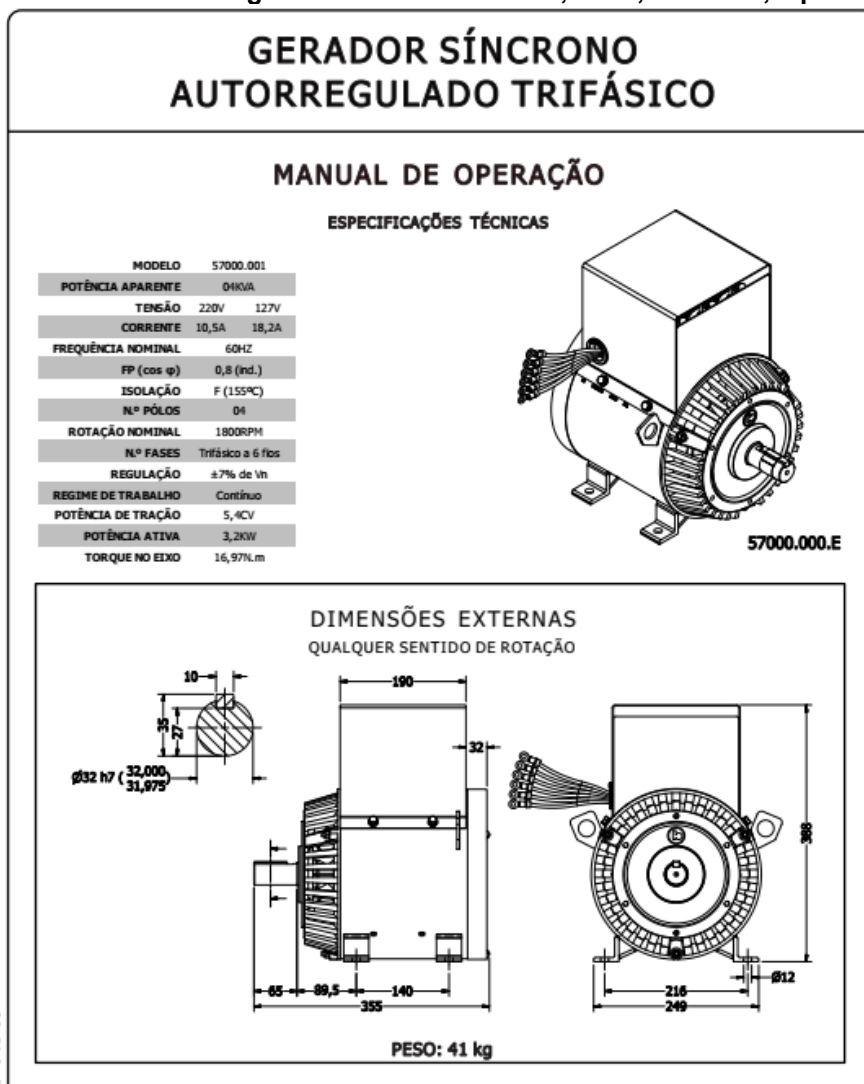
$$f_{máx} = \frac{1}{t}, \quad (20)$$

sendo que, V é o volume do reservatório de ar comprimido em litros, p_{atm} é a pressão atmosférica em Ponta Grossa (nesse caso, 1,015bar), T_{amb} é a temperatura ambiente em °C, FAD é a descarga livre de ar em L/s, $f_{máx}$ é a frequência máxima de operação do compressor (nesse caso, um ciclo a cada 30s), p_t é a pressão de trabalho do compressor (nesse caso, 10bar), p_{op} é a pressão operacional (pressão de trabalho da turbina, nesse caso, 4bar), T_t é a temperatura de trabalho (temperatura aproximada de saída do ar comprimido do compressor) em °C e t é o tempo em s.

3.2.9 Conjunto de geração (turbina pneumática e gerador elétrico)

O conjunto de geração de energia elétrica formado por uma turbina pneumática e um gerador elétrico é o primeiro a ser selecionado, conforme cálculos realizados nas Equações (14) e (15). Para tal, foi necessário selecionar equipamentos de uso comercial. Nesta bancada em escala laboratorial, consideram-se todos equipamentos comerciais encontrados no mercado nacional, ao menor custo possível. Conforme mencionado anteriormente foi selecionado um gerador elétrico trifásico 220V, Bambozzi™, 4kVA (Figura 11) e um motor pneumático (turbina pneumática) Kazi™ de 7,5HP (Figura 12). O método de seleção deve atender ao torque operacional e ao torque e potência de acionamento necessária no eixo do gerador elétrico.

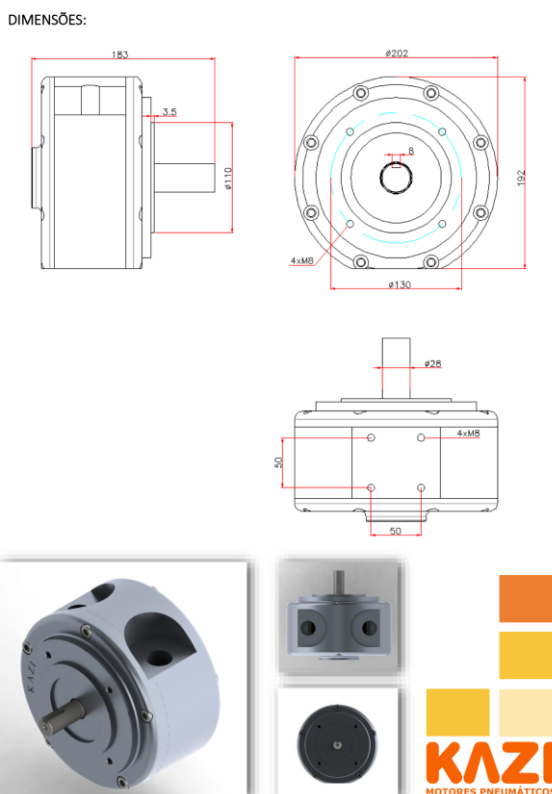
Figura 11 - Dimensões do gerador elétrico de 4kVA, 220V, Trifásico, 4 pólos e 60 Hz



Fonte: Bambozzi (2023)

Figura 12 - Dimensões da turbina pneumática 7,5HP, 17N.m e operação de 4bar a 7bar

Ficha Técnica - KZ 750



Fonte: Kazi (2023)

3.2.10 Dados comparativos para seleção dos equipamentos

A Tabela 5 apresenta os cálculos realizados para atender uma turbina pneumática com consumo de ar obtido pela interpolação estimativa nos gráficos 5 e 6, para torque e potência de acionamento de um gerador elétrico de 6kVA de potência ativa. Nesse caso foi considerado o consumo da turbina, ou seja, a vazão necessária para girar o alternador em 60 L/s de ar comprimido (a 3,5bar). Com a pré-seleção de um reservatório de ar comprimido a 12bar de pressão, obtém-se o tempo de carregamento do mesmo em 4,96 minutos (Equação 17). Da Equação (9) obtém-se a vazão mássica do compressor. Transformando-se a vazão mássica em vazão volumétrica à pressão de 12bar, tendo-se o tempo de carregamento, pré-seleciona-se um compressor de 3HP, 7,06 L/s de vazão volumétrica livre (*FAD*) e 12bar de pressão. Isso posto, refaz-se os cálculos para reservatório de 1000L a 20bar de pressão e 3000L a 30bar, para se calcular o rendimento de cada Sistema A-CAES, o número de ciclo de carregamento e descarregamento e o tempo total diário. Com base no tempo total de funcionamento e na potência do compressor seleciona-se a potência em kW-pico dos painéis fotovoltaicos.

Tabela 5 - Dados dos equipamentos selecionados

TURBINA PNEUMÁTICA						
Consumo de Ar	60	L/s				
Pressão Operacional	3,5	bar				
RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO						
Volume do Reservatório	200	L	FS	10%		
Tempo de Carga	4,96	min	0,08	h		
Tempo de Descarga	0,47	min				
COMPRESSOR						
Potência	3	HP	2,24	kW		
FAD	7,06	L/s				
Pressão de trabalho	12	bar				
Energia	0,19	kW-h				
GERADOR ELÉTRICO						
Alternador	0,04	kW-h	6	kVA	$\cos \varphi$	0,8
SISTEMA						
Rendimento	20,29		28,93		53,44	%
Número de ciclos	200L	58,91	1000L	8,35	3000L	2,92 ciclos/dia
Tempo total	12bar	27,82	20bar	38,28	30bar	64,40 min/dia
Energia Elétrica	1,04		1,98		5,60	KW-h/dia
FOTOVOLTAICO						
Painéis Fotovoltaicos	5,58	kWp	5,5	horas	30,69	kW-h nominal

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Tabela 6 são simuladas configurações variando-se em primeiro lugar o volume dos reservatórios de ar comprimido e depois as pressões de armazenamento e as potências de compressão. O objetivo foi verificar qual é o rendimento para cada configuração. O sistema implantado terá seus dados experimentais confrontados com esses resultados. Usando-se as Equações (17) e (18) para calcular os tempos de carregamento e de descarregamento, respectivamente, obtém-se o rendimento. Nota-se que para a configuração com reservatório de 200L com compressor de 3CV, pressão operacional de 12bar obtém-se um rendimento estimado de 20,29%. Também se demonstra a relação direta da pressão de armazenamento (reservatório de ar comprimido) com a eficiência do Sistema A-CAES.

Tabela 6 - Seleção do compressor e vaso de pressão (reservatório de ar comprimido)

COMPARATIVO							
Compressor				Reservatório		Gerador	
Potência (CV)	FAD (l/s)	Pressão (bar)	Tempo (min)	Capacidade (litros)	Tempo (min)	Energia (kW-h)	Eficiência (%)
3,0	3,1	30	6,07	200	1,47	0,119	53,44
5,5	5,5	30	3,42	200	1,47	0,119	51,72
3,0	3,6	20	6,98	200	0,92	0,074	28,93
5,5	6,3	20	3,99	200	0,92	0,074	27,61
3,0	4,7	15	6,57	200	0,64	0,052	21,43
5,5	7,9	15	3,91	200	0,64	0,052	19,65
3,0	7,1	12	5,13	200	0,47	0,038	20,29
5,5	9,7	12	3,73	200	0,47	0,038	15,21
7,5	13,6	12	2,66	200	0,47	0,038	15,63
10,0	18,2	12	1,99	200	0,47	0,038	15,69
3,0	3,1	30	30,36	1000	7,36	0,596	53,44
5,5	5,5	30	17,11	1000	7,36	0,596	51,72
3,0	3,6	20	34,92	1000	4,58	0,371	28,93
5,5	6,3	20	19,96	1000	4,58	0,371	27,61
3,0	4,7	15	32,85	1000	3,19	0,259	21,43
5,5	7,9	15	19,55	1000	3,19	0,259	19,65
3,0	7,06	12	25,65	1000	2,36	0,191	20,29
5,5	9,7	12	18,67	1000	2,36	0,191	15,21
7,5	13,6	12	13,32	1000	2,36	0,191	15,63
10,0	18,2	12	9,95	1000	2,36	0,191	15,69
3,0	3,1	30	91,08	3000	22,08	1,789	53,44
5,5	5,5	30	51,33	3000	22,08	1,789	51,72
3,0	3,6	20	104,77	3000	13,75	1,114	28,93
5,5	6,3	20	59,87	3000	13,75	1,114	27,61
3,0	4,7	15	98,56	3000	9,58	0,776	21,43
5,5	7,9	15	58,64	3000	9,58	0,776	19,65
3,0	7,06	12	76,95	3000	7,08	0,574	20,29
5,5	9,7	12	56,01	3000	7,08	0,574	15,21
7,5	13,6	12	39,95	3000	7,08	0,574	15,63
10,0	18,2	12	29,85	3000	7,08	0,574	15,69

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 7 mostra os resultados dos cálculos obtidos para reservatório de ar comprimido de 3000L considerando diferentes pressões de operação e as transformações para volume normal, para cálculo da potência útil na turbina de forma estimada.

Tabela 7 - Cálculos para reservatório de ar comprimido de 3000L operando em diferentes pressões

RESERVATÓRIO 3000 litros / 250 bar					
ITEM	DESCRIÇÃO	DIMENSÃO	UNIDADE	CONVERSÃO	UNIDADE
1	PRESSÃO OPERACIONAL	250	BAR	250	kgf/cm ²
2	TEMPO DE CARREGAMENTO	1.679	minutos	27,99	h
3	CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO	738	m ³	738.000	litros PO
4	TEMPO DE DESCARREGAMENTO	44	minutos	0,73	h
5	RESERVATÓRIOS PADRÃO	1	peças	3000	litros
6	VOLUME ARMAZENADO	738.000	litros	738	Nm ³
7	POTÊNCIA ARMAZENADA	188,77	kW		
8	POTÊNCIA ÚTIL TURBINA	188,77	kW		
9	PERDAS NA CONVERSÃO TURBINA	-	kW	0%	
RESERVATÓRIO 3000 litros / 15 bar					
ITEM	DESCRIÇÃO	DIMENSÃO	UNIDADE	CONVERSÃO	UNIDADE
1	PRESSÃO OPERACIONAL	15	BAR	15	kgf/cm ²
2	TEMPO DE CARREGAMENTO	161	minutos	2,68	h
3	CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO	3,21	m ³	3214,28571	litros PO
4	TEMPO DE DESCARREGAMENTO	3	minutos	0,04	h
5	RESERVATÓRIOS PADRÃO	1	peças	3000	litros
6	VOLUME ARMAZENADO	45.000	litros	45	Nm ³
7	POTÊNCIA ARMAZENADA	49,29	kW		
8	POTÊNCIA ÚTIL TURBINA	2,71	kW		
9	PERDAS NA CONVERSÃO TURBINA	46,58	kW	95%	
RESERVATÓRIO 3000 litros / 30 bar					
ITEM	DESCRIÇÃO	DIMENSÃO	UNIDADE	CONVERSÃO	UNIDADE
1	PRESSÃO OPERACIONAL	30	BAR	30	kgf/cm ²
2	TEMPO DE CARREGAMENTO	236	minutos	3,94	h
3	CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO	78,00	m ³	78.000	litros PO
4	TEMPO DE DESCARREGAMENTO	70	minutos	1,17	h
5	RESERVATÓRIOS PADRÃO	1	peças	3000	litros
6	VOLUME ARMAZENADO	78.000	litros	78	Nm ³
7	POTÊNCIA ARMAZENADA	251,28	kW		
8	POTÊNCIA ÚTIL TURBINA	7,95	kW		
9	PERDAS NA CONVERSÃO TURBINA	243,33	kW	97%	
RESERVATÓRIO 3000 litros / 12 bar					
ITEM	DESCRIÇÃO	DIMENSÃO	UNIDADE	CONVERSÃO	UNIDADE
1	PRESSÃO OPERACIONAL	12	BAR	12	kgf/cm ²
2	TEMPO DE CARREGAMENTO	57	minutos	0,94	h
3	CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO	24,00	m ³	24.000	litros PO
4	TEMPO DE DESCARREGAMENTO	1	minutos	0,02	h
5	RESERVATÓRIOS PADRÃO	1	peças	3000	litros
6	VOLUME NORMAL ARMAZENADO	24.000	litros	24	Nm ³
7	POTÊNCIA ARMAZENADA	2,11	kW		
8	POTÊNCIA ÚTIL TURBINA	1,05	kW		
9	PERDAS NA CONVERSÃO TURBINA	1,06	kW	50%	

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 8 apresenta os cálculos realizados através das Equações (3), (4), (9) e (10) para a configuração de reservatório de 200 litros e pressão de

armazenamento de 12bar. Com base nessas equações, primeiramente calcula-se os tempos de carregamento e descarregamento do reservatório de ar comprimido, Equações (17) e (18). A partir da potência da turbina pneumática e da entalpia do ar na entrada do compressor, obtém-se a entalpia do ar no reservatório de ar. Considerando-se a transformação isoentrópica (expansão na turbina) obtém-se a entalpia de saída na turbina. Fazendo o balanço energético na saída do reservatório de ar e na saída da turbina, tem-se as energias armazenada (reservatório) e a energia útil na turbina.

Tabela 8 - Cálculos para reservatório de ar comprimido de 200L operando a 12bar

RESERVATÓRIO ACOPLADO 200 litros / 12 bar					
ITEM	DESCRIÇÃO	DIMENSÃO	UNIDADE	CONVERSÃO	UNIDADE
1	PRESSÃO OPERACIONAL		12 Bar		12 kgf/cm ²
2	TEMPO DE CARREGAMENTO		3,78 minutos	0,06	h
3	CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO		0,20 m ³		200 litros
4	TEMPO DE DESCARREGAMENTO	0,47	minutos	0,01	h
6	VOLUME ARMAZENADO		200 litros	ENTALPIA	kJ/kgK
7	ENERGIA ARMAZENADA	0,138	kW-h	hr	603,09
8	ENERGIA ÚTIL TURBINA	0,081	kW-h	hs	421,26
9	PERDAS NA CONVERSÃO TURBINA	0,057	kW-h	Ps (kW)	1,28

Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.11 Conjunto fotovoltaico

As principais incertezas do projeto correspondem ao correto dimensionamento do sistema fotovoltaico, de tal forma que o mesmo seja o mais próximo possível da potência de acionamento do compressor e, ao mesmo tempo, possibilite o melhor aproveitamento da energia fotovoltaica durante o período de 8 horas (valor atribuído considerando-se a horas solares com maior insolação na face de instalação dos painéis fotovoltaicos). As formas de cálculo disponíveis nos sites eletrônicos das concessionárias e nos fornecedores de painéis fotovoltaicos não fazem essa consideração, apenas sobre o valor consumido mensal e a localidade de implantação do sistema. Por isso, no projeto implantado adotou-se a simulação computacional através do *software* PVSystem™ (PVSYST).

Para a potência de 2,2kW do compressor, o resultado da potência dos painéis fotovoltaicos em kW-p, levando em consideração como dados iniciais a energia média necessária para funcionamento durante 30 dias, período mínimo de 4,5h diários, é de

300 kW-h. E como consumo total a energia necessária para atender 8,0h diárias com total de 528 kW-h, pelo mesmo método e potência do compressor.

Pela calculadora solar da Companhia Paranaense de Energia (Copel), disponibilizada na internet em <https://www.copel.com>, aplicando-se os dados de consumo para um período de 4,5h durante 30 dias, a potência estimada necessária para acionamento do motor elétrico do compressor é de 4,91kW-p (Quadro 1).

Quadro 1 - Calculadora Solar Copel™ para Ponta Grossa: 4,9 kWh-p

Fonte: Copel (2022)

O conjunto fotovoltaico selecionado considera a corrente de partida do compressor com folga, e também os dados para consumo de energia elétrica mensal em até 825kW-h/mês. Dessa forma, analisando os dados de potência fornecida pelo fabricante, o mesmo pode atender a necessidade do compressor.

a) Dados elétricos:

Tabela 9 - Dados técnicos elétricos para painéis fotovoltaicos

Dados técnicos dos painéis fotovoltaicos para conjuntos de 4,02 kWp	
Potência nominal máx. ($P_{máx}$)	335W
Tensão operacional ideal (V_{mp})	38,10V
Corrente operacional ideal (I_{mp})	8,79A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	45,44 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	9,25A
Eficiência do módulo	17%
Temperatura operacional	-40 °C até +85°C
Tensão máxima do sistema	1.500V
Classificação máxima de fusíveis da série	15 A
Dimensionamento para instalação dos painéis	
Área mínima necessária	24 m ²
Peso sobre o telhado	18 kg/m ² (com estrutura)
Forma de montagem e ligações elétricos	1 arranjos de 12 Painéis de 72 células

Fonte: Neosolar (2020)

Pesquisando em sites eletrônicos comerciais de fornecimento de conjuntos fotovoltaicos, para a potência aproximada de 4,02kW-p, encontrou-se um conjunto comercial fornecido por NeoSolar™, composto por painéis fotovoltaicos e inversor eletrônico. Os dados técnicos dos painéis fotovoltaicos constam na Tabela 9.

b) Informações do inversor:

O inversor, que é integrante do conjunto fotovoltaico NeoSolar™, de 4,02 kWp selecionado, é o componente principal do quadro de comando e força do sistema elétrico do Sistema A-CAES projetado. Além de fazer a conversão da energia solar do sistema contínuo para a frequência de 60Hz, compatível com o motor do compressor, tem outras funções de automação e elétrica. É, o inversor, também um componente de proteção do sistema contra curtos-circuitos, faz o registro da tensão e corrente operacionais do compressor, regula a frequência (conforme parametrização) em até 47Hz de forma automática. A frequência mínima recomendada para um motor elétrico não enclausurado e com ventilação forçada é 30Hz. Essa modulação da frequência serve para melhor aproveitamento do ciclo de energia fotovoltaica solar, isto é, nos horários com baixa incidência solar, ele reduz a frequência para poder acionar o motor elétrico do compressor, dando continuidade ao processo de armazenamento de ar comprimido no reservatório. Por exemplo, em outubro de 2019, conforme coleta de dados registrada no CLP através de um cartão SD de memória incorporada, foram registrados funcionamentos do compressor às 17:43, horário que apresenta baixa incidência solar, na frequência de 50Hz. Quando isso acontece, o tempo de enchimento do reservatório aumenta, pois a frequência é menor que 60Hz. Quando há redução da frequência de acionamento do motor elétrico do compressor, há redução proporcional da velocidade de giro do virabrequim do compressor, tornando os ciclos de compressão mais lentos. Os dados técnicos elétricos do inversor fornecido por NeoSolar™, são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados técnicos elétricos para inversor

(continua)

Dados Técnicos do Inversor para conjuntos de 4,02 kWp	
Entrada do inversor (conexão com os painéis fotovoltaicos)	
Máx. tensão de entrada (V_{max}):	600V
Tensão de partida (V_{start}):	200V
Tensão nominal (V_{dcr}):	360V
Potência nominal (P_{dcr}):	4250W
Número de rastreador:	2 x MPPT
Potência máxima para cada MPPT:	3000W
Faixa de tensão de entrada do MPPT:	130V até 530V

Tabela 10 - Dados técnicos elétricos para inversor

		(conclusão)
Corrente de entrada máx.:	32A	
Corrente te entrada máx. por MPPT:	16A	
Corrente de curto circuito máx. por MPPT:	20A	
Número de pares de entrada por MPPT:	1	
Saída do inversor (conexão com o motor elétrico do compressor)		
Potência nominal de saída (P_{acr}):	4.000W	
Potência máx. de saída (P_{acmax}):	4.000W	
Potência aparente máx. (S_{max}):	4.000VA	
Tensão nominal da rede (V_{acr}):	230V	
Corrente máx. de saída ($I_{ac, max}$):	17.2A	
Faixa de Tensão (conexão à rede):	180V até 264V	
Frequência de saída nominal:	50Hz / 60Hz (47 - 63Hz)	
Fator de potência nominal e faixa ajustável:	> 0,995	
Distorção harmônica total de corrente:	< 3.5%	
Gerais (para montagem e verificação da compatibilidade com o local de instalação)		
Nível de isolamento:	sem transformador	
Classificação de proteção:	IP 65	
Sistema de montagem:	suporte de parede	
Faixa de temperatura ambiente	-25°C a 60°C	
Refrigeração:	Natural	
Umidade relativa permitida:	0 a 100%	
Máxima altitude operacional:	2.000m	

Fonte: Neosolar (2020)

3.3 Conclusões dos cálculos de projeto

A execução da bancada de testes requer uma série de confirmações com os fabricantes, porém não há dados confiáveis de rendimento dos sistemas pneumáticos, especialmente da turbina pneumática. Essa turbina, devido suas características técnicas, pode ir a limitar em aproximadamente 38% o rendimento global. Será interessante, em um trabalho futuro, avaliar se não existirá um sistema diferente para turbina de ar comprimido, que tenha menor consumo de ar e mais torque disponível. Sugere-se projeto, simulação e construção desse equipamento, como forma de orientar o uso da turbina projetada e construída para sistemas A-CAES de forma específica. Uma solução possível, é estudar um sistema de fluxo misto (radial-axial) para desenvolvimento da potência e torques necessários.

Outro dispositivo utilizado no Sistema A-CAES que possui baixo rendimento é o compressor comercialmente disponível. O problema está na limitação da potência do equipamento, porque o sistema requer um carregamento rápido (ou seja, grande vazão) a uma pressão de 12bar. Será estudado na sequência um compressor de 3HP e 200L Chiaperini™ modelo CJ-15, que poderá ter variação de frequência no seu

motor parametrizada pelo inversor fotovoltaico, mantendo constante o funcionamento e a pressurização do sistema, que nesse caso trata-se apenas do reservatório de ar comprimido. Normalmente, para essas características do Sistema A-CAES, tem-se uma melhora no rendimento geral com uso de compressores parafuso controlados eletronicamente. Entretanto, devido a disponibilidade de potência dos compressores parafusos comercialmente disponíveis pesquisados no mercado, seria necessário o aumento da potência dos painéis fotovoltaicos e do inversor, que passaria a ter 8,04kWp.

3.4 Comparativo genérico com diversos sistemas de pequeno porte

Uma análise de dados gerais para diversos Sistemas de CAES é apresentada a seguir, com visualização do rendimento global entre a entrada de energia elétrica via painéis fotovoltaicos e a saída de energia elétrica via gerador comercial. Considerando um modelo de compressor 3HP e 200L Chiaperini™ modelo CJ-15, foi executada uma atualização dos principais dados operacionais. Na Tabela 11 são apresentados os resultados para tempo de funcionamento do compressor para um volume normal de ar preenchido de 2.182 litros (reservatório de ar comprimido).

A Tabela 12 compara 4 modelos de compressores disponíveis no mercado, compressores Atlas Copco™ modelo SV225/250, LT 5-30 e LT3-15 e compressor Chiaperini™ modelo CJ-15. Também, nessa tabela se faz a correlação da pressão operacional com o rendimento global, isto considerando-se inclusive a vazão mássica para turbina pneumática.

Tabela 11 - Resumo de cálculos considerando compressor 3HP, 200L e 12bar

COMPRESSOR Chiaperini 2,2 kW - 12 bar						
ITEM	DESCRIÇÃO	DIMENSÃO	UNIDADE	CONVERSÃO	UNIDADE	OBS.
1	PRESSÃO OPERACIONAL	12	BAR	12	kgf/cm ²	
2	VAZÃO OPERACIONAL	0,0385	m ³ /min	2,31	m ³ /h	
3	TEMPO DE FUNCIONAMENTO	57	minutos	0,94	h	
4	PRODUÇÃO	2,18	m ³	2182	litros	
5	RENDIMENTO	34%		1,03	(m ³ /h)/kW	
6	POTÊNCIA (máxima)	2,20	kW	3,0	HP	
7	FATOR DE SEGURANÇA	50%		$\eta_{\text{isoentropica}}$	83%	
8	ENERGIA CONSUMIDA	2,08	kW-h	7.472	J	
9	ENERGIA PRODUZIDA	1,99	kW-h	7.160	J	
10	PERDAS NA COMPRESSÃO	0,09	kW-h	4%		

Fonte: Autoria própria (2023)

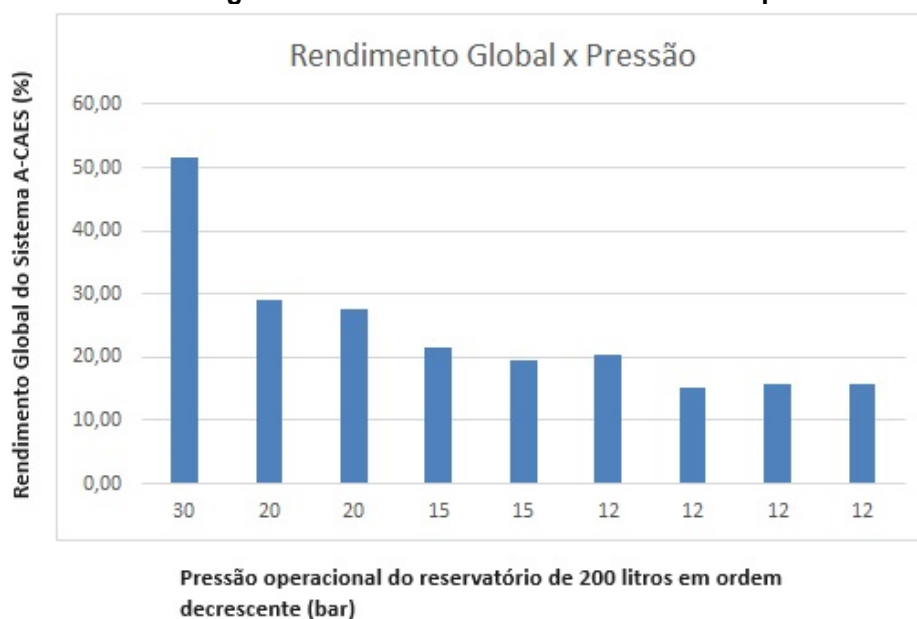
Tabela 12 - Comparativo de eficiência para diferentes pressões operacionais

TABELAS COMPARATIVAS						
ITEM	DESCRIÇÃO	SV225/250(LT 5-30)	LT 3-15	Chiaperini	OBSERVAÇÃO	
1	PRESSÃO OPER.	150	30	15	12	BAR
2	POTÊNCIA NOMINAL	9,50	4,00	2,24	2,20	kW
3	VAZÃO DE AR	0,11	0,68	1,20	2,31	m ³ /h
4	POTÊNCIA FOTOVOLTAICA	12,00	4,50	3,00	3,00	kW-p
5	RENDIMENTO DO SISTEMA	34%	45%	34%	20%	GLOBAL

Fonte: Autoria própria (2023)

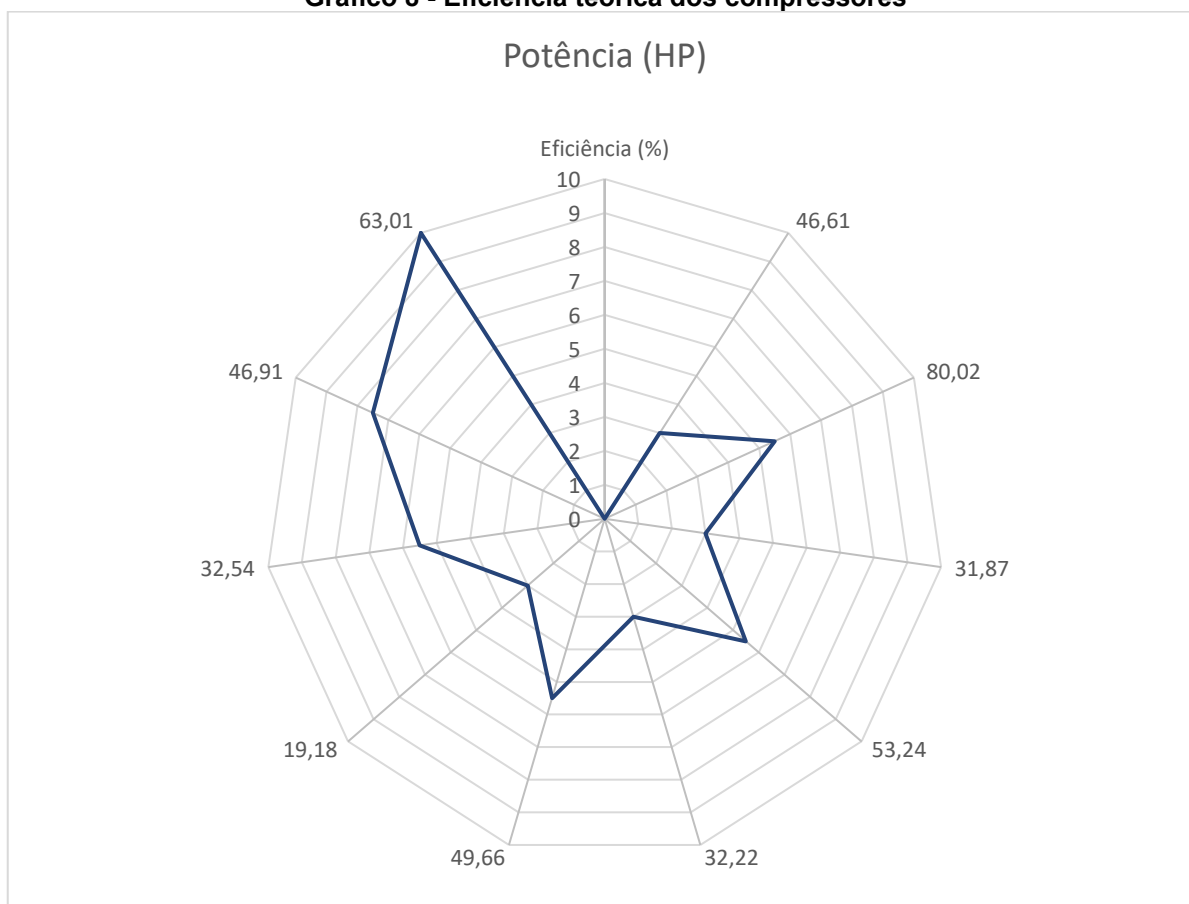
No Gráfico 7 é ilustrado o comportamento entre as pressões operacionais de compressão e o rendimento global do sistema. Isso pode ser verificado observando-se os dados de rendimento apresentados na Tabela 6, onde se estratificando os dados para mesmo volume do reservatório tem-se o aumento do rendimento global em função do aumento da pressão de armazenamento do ar comprimido no reservatório.

Gráfico 7 - Rendimento global de Sistema CAES de acordo com a pressão de trabalho



Fonte: Autoria própria (2023)

O Gráfico 8 ilustra a variação da eficiência dos compressores comercialmente disponíveis, considerando-se o volume de controle envolvendo o compressor e o reservatório de ar comprimido, para potência de até 10HP. A máxima eficiência, nesse caso, ficaria com o compressor de 10HP (63,01%), para um reservatório de 2000L. O compressor Chiaperini™ de 3HP e 200L apresenta eficiência de 46,61%.

Gráfico 8 - Eficiência teórica dos compressores

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 13 apresenta um resumo das potências requeridas e perdas em cada estágio do Sistema CAES, apresentando uma projeção de balanço energético desde o sistema de geração de energia fotovoltaica requerida até a regeneração pela turbina pneumática e gerador síncrono acoplado. Nesse caso, os dados comerciais usados no cálculo do rendimento global do sistema têm uma boa projeção, 37% de rendimento global, muito semelhante às plantas industriais de McIntosh™ nos Estados Unidos da América e de Huntorf™ na Alemanha. Esses dados foram baseados no compressor Chiaperini™ de 3HP e 200L modelo CJ-15, selecionado para a presente montagem do sistema em escala laboratorial na UTFPR campus Ponta Grossa.

Tabela 13 - Resumo de perdas e potências requeridas com compressor Chiaperini™ 3HP

RESUMO DE CÁLCULOS PARA COMPRESSOR CHIAPERINI 3,0HP						
ITEM	DESCRIÇÃO	DIMENSÃO	UNIDADE	CONVERSÃO	UNIDADE	OBS
1	ENERGIA SOLAR GERADA	2,83	kW-h	10.189	KJ	
2	ENERGIA PNEUMÁTICA ARMAZ.	2,11	Kw-h	7.589	KJ	
3	ENERGIA ELÉTRICA GERADA	1,05	kW-h	3.785	KJ	
4	RENDIMENTO DA INSTALAÇÃO	37%				
PERDAS PERCENTUAIS						
5	PERDAS NA COMPRESSÃO	0,72	kW-h	26%		
6	PERDAS NA TURBINA	1,06	Kw-h	50%		
POTÊNCIAS REQUERIDAS						
7	PAINÉIS	3,00	kW-p	57	minutos	
8	COMPRESSOR	4,40	kW	57	minutos	
9	TURBINA	5,52	kW	1	minutos	
10	GERADOR	3,95	kW	1	minutos	
ENERGIAS REQUERIDAS						
11	PAINÉIS	2,83	kW-h	10.189	KJ	
12	COMPRESSOR	4,15	kW-h	14.943	KJ	
13	TURBINA	0,13	kW-h	473	KJ	
14	GERADOR	0,09	kW-h	339	KJ	
PERDAS ESTAGIADAS						
15	COMPRESSOR	0,09	kW-h	30%		
16	TURBINA	1,02	kW-h	50%		
17	GERADOR	7,87	kW-h	99%		

Fonte: Autoria própria (2023)

3.5 Estimativa orçamentária para o sistema primário

A estimativa orçamentária é baseada em dados fornecidos por fabricantes após consulta de preços. A estimativa do quadro de comando é baseada na experiência profissional do autor e também na coleta de orçamentos junto às empresas que trabalham com sistemas elétricos. A Tabela 14 mostra os valores estimados para implantação de um Sistema A-CAES com os equipamentos e componentes desejados inicialmente para construção em laboratório é de R\$ 45.871,43.

Tabela 14 - Planilha orçamentária

ITEM	DESCRIÇÃO	PREÇO UNITÁRIO	QTDE	PREÇO TOTAL
1	Kit Fotovoltaico 4,02kWp / 220V	15.679,90	1	15.679,90
2	Compressor Chiaperini™ CJ-15 3HP	2.999,00	1	2.999,00
3	Turbina Kazi™ KAZ750 7,5HP	3.531,00	1	3.531,00
4	Gerador Bambozzi™ 4kVA	1.607,53	1	1.607,53
5	Quadro de comando	22.000,00	1	22.000,00
VALOR TOTAL [R\$]				45.871,43

Fonte: Autoria própria (2023)

3.6 Projeto implantado no LabMPEE-DAMEC (UTFPR) Ponta Grossa

Realizados os cálculos teóricos fundamentais para início do projeto de um Sistema CAES (em escala laboratorial), direcionou-se os esforços para cálculos finais seletivos de equipamentos comerciais para instalação de um sistema compatível com a teoria apresentada anteriormente. Há de se mencionar modificações que foram necessariamente executadas para haver viabilidade comercial e orçamentária no projeto apresentado anteriormente. Também foram agregados controles absolutamente necessários, haja vista que um dos objetivos do sistema é a regularização e estabilização de sistemas elétricos. Assim sendo, deve ser altamente confiável em termos controles de potência, geração e fluxo pneumático.

Também há de se mencionar que o Sistema A-CAES proposto está em escala laboratorial, isto é, possíveis divergências com os sistemas comercialmente empregados (que são de grande porte) são esperadas. Além disso, outras diferenças são naturalmente observadas, tais como: os sistemas de grande porte possuem equipamentos híbridos, que empregam energia térmica (proveniente de fonte fósseis combustíveis) e energia de pressurização (proveniente das cavernas onde o ar está comprimido) ao mesmo tempo nas turbinas geradoras. Portanto, a eficiência geral dos sistemas provavelmente não será a mesma, haja vista as irreversibilidades existentes em um sistema de compressão de ar. Também, há a diferença em se empregar uma turbina compressora, equipamento projetado normalmente para grandes vazões e pressões e um sistema de compressão à pistão alternativo comercial. Essas diferenças construtivas foram necessárias por questões de compatibilização comercial, orçamentária e facilidades construtivas.

3.6.1 Seleção dos painéis fotovoltaicos

A seleção dos painéis fotovoltaicos foi o primeiro item a ser selecionado para o projeto, pois objetiva viabilizar de forma cabal a captação através de uma fonte de energia renovável e instável, pois a potência fornecida varia durante o dia, bem como as condições climáticas, época do ano, forma e ângulo de instalação, orientação geográfica, limpeza dos painéis fotovoltaicos, entre outros. Havia no DAMEC da UTFPR campus Ponta Grossa, alguns painéis fotovoltaicos disponíveis, que foram complementados pela aquisição de outros durante a execução deste projeto de

pesquisa. As suas características eram semelhantes, porém adequações foram necessárias.

Nesse caso, para compor o sistema de geração fotovoltaica, utilizou-se o *software* comercial de simulação PVSYST V6™ para cálculos das potências, perdas e também estimativa da energia gerada a partir dos dados de latitude, longitude, altitude da cidade de Ponta Grossa/PR/Brasil. Também, foram consideradas nessa simulação o modelamento matemático de insolação (que faz parte da estrutura de programação do próprio *software*), a orientação e o ângulo de instalação dos painéis fotovoltaicos. O modelo de simulação empregado no *software* PVSYST V6™, foi o Perez Meteororm™. Baseado nessa simulação, o *software* comercial sugere a potência, a forma construtiva em módulos e o modelo de alguns painéis fotovoltaicos. Essas informações estão dispostas no Quadro 2, gerada a título de relatório pelo PVSYST V6™.

Quadro 2 - Simulação para seleção dos painéis fotovoltaicos

Software de simulação PVSYST V6.84™			Data:	15/10/2019
<i>Stand Alone System: Parâmetros de Simulação</i>				
Projeto:	Sistema A-CAES Laboratorial UTFPR - Ponta Grossa			
Localização Geográfica	Ponta Grossa		País	Brasil
Localização	Latitude	-25.09° S	Longitude:	-50.16 W
Tempo definido como	Tempo legal	Fuso Horário TU-03	Altitude:	954 m
Variante da Simulação	SIM04	Data da Simulação	15/10/2019	21h34min
Tipo de Sistema	Isolado	Sem Baterias	Sem Gerador	Backup Pneumático
Orientação do plano dos módulos			Inclinação: 30°	Azimute 0°
Modelos utilizados	Transposição	Perez	Difuso	Perez, Meteororm
Exigências do consumidor	Consumo doméstico		Constantes ao longo do ano	
Média	9.5	kW-h / Dia		
<i>Características do Grupo Fotovoltaico</i>				
Modulo FV	Si-poly	Modelo	Poly 110 Wp	72 cells
Original PVSYST Database		Fabricante	Generic	
Número de módulos FV	Em série	2 módulos	Em paralelo	23 strings
Número total de módulos	Nr de módulos	46	Potência Unitária	110 Wp
Potência global do grupo	Nominal (STC)	5.06 kWp	Operacionais	4501 Wp (50 °C)
Caract. Oper. (50 °C)	Umpp	62 V	I mpp	73 A
Superfície total	Módulos	41,3 m ²	Célula	36,4 m ²
Backup indicado	Potência	1,5 kW	Tensão	220 V
<i>Fatores de perda do grupo FV</i>				
Fator de perdas térmicas	Uc (const)	20.0 W/m ² K	Uv (vento)	0.0 W/m ² K m/s

Perdas ôhmicas nos cabos	Res.Global	14 mOhm	Fração de perdas	de	1,5% STC
Perdas diodo série	Queda Tensão	0,7 V	Fração de perdas	de	1,0% STC
Perdas de qualidade dos módulos			Fração de perdas	de	1,5%
Perdas nos módulos com mismatch			Fração de perdas	de	2,5% (tensão fixa)
Perdas de strings nos módulos			Fração de perdas	de	0,10 %
Efeito de incidência, ASHRAE	parametrização	IAM=1-bo(1/cosi - 1)	Param. bo		0,05

Fonte: PVSYST (2023)

O Quadro 3 apresenta dados relacionados com a potência a ser fornecida para o motor elétrico do compressor, de 3HP, e tem a simulação da potência considerando-se o período de 6 horas de funcionamento desse. Como a simulação envolve cálculo estatísticos de insolação, a potência sugerida é um pouco maior que a do compressor, que requer 2,2kW para acionamento. Então foi simulado pelo *software* comercial PVSYST V6™ uma potência de 5,06kW-p para atender todo esse período, pois a insolação varia, entre outros fatores também, com a hora solar.

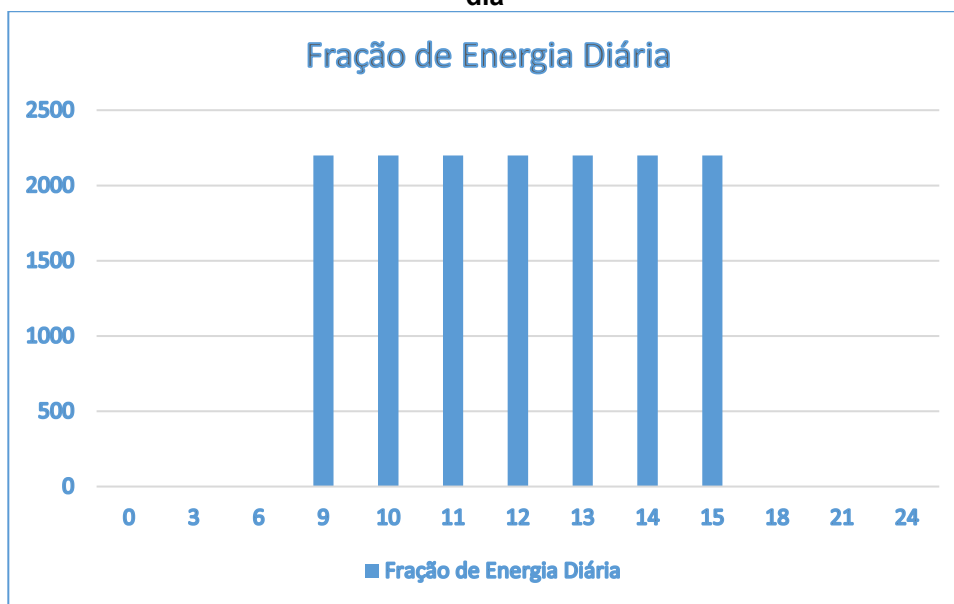
Quadro 3 - Simulação para seleção dos painéis fotovoltaicos: exigência do consumidor

Software de simulação PVSYST V6.84			Data:	15/10/2019
Stand Alone System: Parâmetros de simulação				
Projeto:	Sistema A-CAES Laboratorial UTFPR - Ponta Grossa			
Variante da Simulação	SIM04	Data da Simulação	15/10/2019	21h34min
Tipo de Sistema	Isolado	Sem Baterias	Sem Gerador	Backup Pneumático
Exigências do consumidor	Consumo doméstico		Constantes ao longo do ano	
Média	9.5	kW-h / Dia	Consumo anual	3451 kW-h / ano
Modulo FV	Si-poly	Modelo	Poly 110 Wp	72 cells
Número total de módulos	Nr de módulos	46	Potência Unitária	110 Wp
Potência global do grupo	Nominal (STC)	5.06 kWp	Operacionais	4501 Wp (50 °C)
Utilização: dias/semana	5	Quantidade: 01	Potência: 2200 W	Utilização: 6h/dia
Compressor pneumático	Trifásico	220 V	Standby consumer	24 Wh/dia

Fonte: PVSYST (2023)

O Quadro 3 sugere a instalação de 46 módulos de 110 W-p (cada) para a potência requerida pelo compressor de 2,2kW (3HP), com utilização linear das 9h às 15h, diariamente. Esse perfil de consumo constante é apresentado no Gráfico 9.

Gráfico 9 - Perfil de consumo fotovoltaico: potência requerida pelo compressor x horário do dia



Fonte: PVSYST (2023)

O Quadro 4 apresenta um resumo anual de energia gerada (6,18MWh/ano) e energia consumida pelo compressor (3,45MWh/ano), sendo que o excedente pode ser distribuído para a rede de alimentação elétrica (2,34MWh/ano).

Quadro 4 - Simulação para seleção dos painéis fotovoltaicos: resultados principais

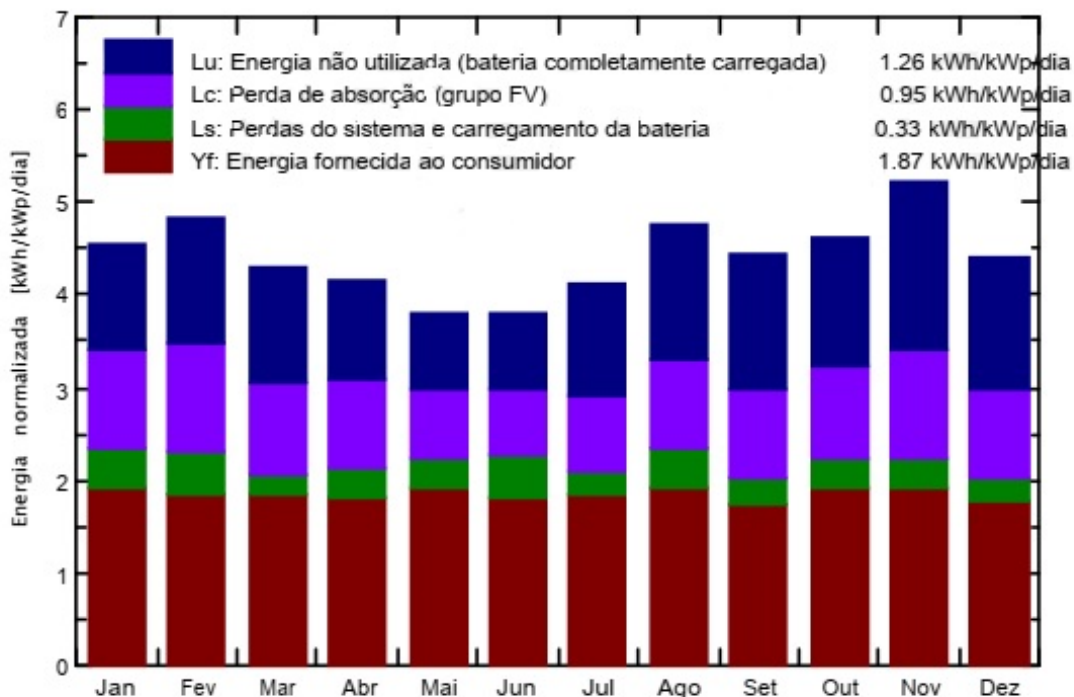
Software de simulação PVSYST V6.84™		Data:	15/10/2019	
Stand Alone System: Parâmetros de simulação				
Projeto:	Sistema A-CAES Laboratorial UTFPR - Ponta Grossa			
Variante da Simulação	SIM04	Data da Simulação	15/10/2019	21h34min
Tipo de Sistema	Isolado	Sem Baterias	Sem Gerador	Backup Pneumático
Exigências do consumidor	Consumo doméstico		Constantes ao longo do ano	
Média	9.5	kW-h / Dia	Consumo anual	3451 kW-h / ano
Modulo FV	Si-poly	Modelo	Poly 110 Wp	72 cells
Número total de módulos	Nr de módulos	46	Potência Unitária	110 Wp
Potência global do grupo	Nominal (STC)	5.06 kWp	Operacionais	4501 Wp (50 °C)
Produção do sistema	Energia dispon.	6181 kW-h/ano	Prod. Específica	1221 kW-h/kWp/ano
	Energia utilizada	3451 kW-h/ano	Excedente	2337 kW-h / ano
	Performance	42,37%	Fração Solar	99,99%

Fonte: PVSYST (2023)

O Gráfico 10 ilustra a distribuição de potências teóricas em sistema fotovoltaico com uso de baterias, pois as potências não fornecidas ao consumidor

(motor elétrico do compressor) podem ser entendidas como a potência produzida no tempo de funcionamento do Sistema A-CAES.

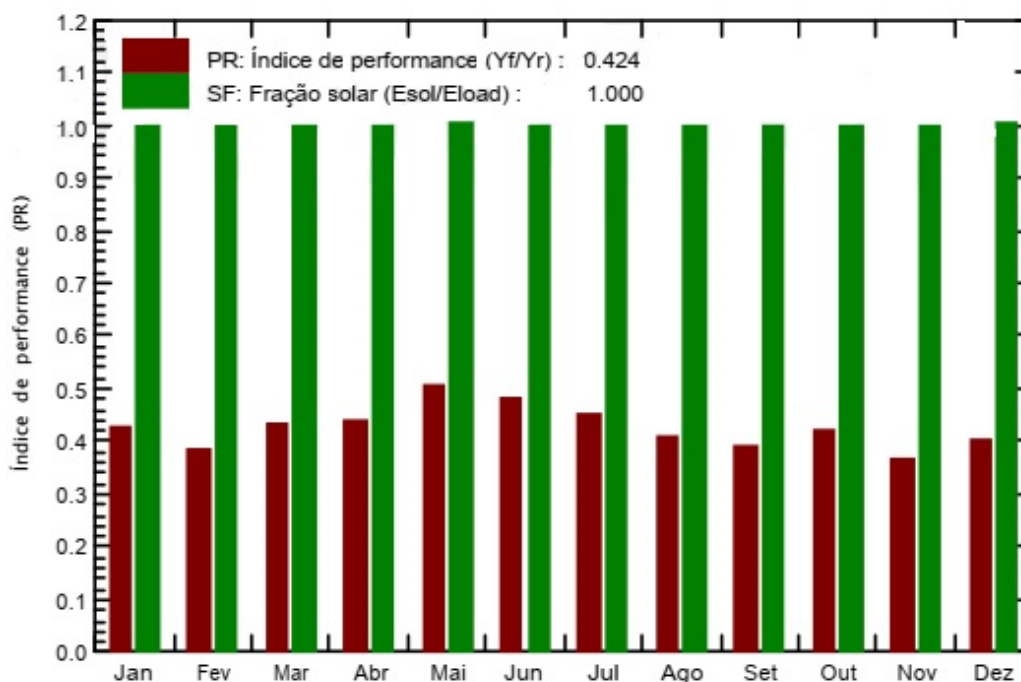
Gráfico 10 - Distribuição energética nos meses do ano
Produções normalizadas (por kWp instalado): Potência nominal 5.06 kWp



Fonte: PVSYST (2023)

O Gráfico 11 ilustra o índice de rendimento em relação a fração solar gerada pelo sistema fotovoltaico.

Gráfico 11 - Índice de rendimento e fração solar nos meses do ano
Índice de performance (PR) e Fração solar



Fonte: PVSYST (2023)

Para o modelo Perez Meteororm™, o Quadro 2 e o Gráfico 12 fazem a correlação com a insolação simulada e sua distribuição entre as energias incidentes, não utilizada pelo compressor (durante o funcionamento do Sistema A-CAES), e requeridas pelo compressor.

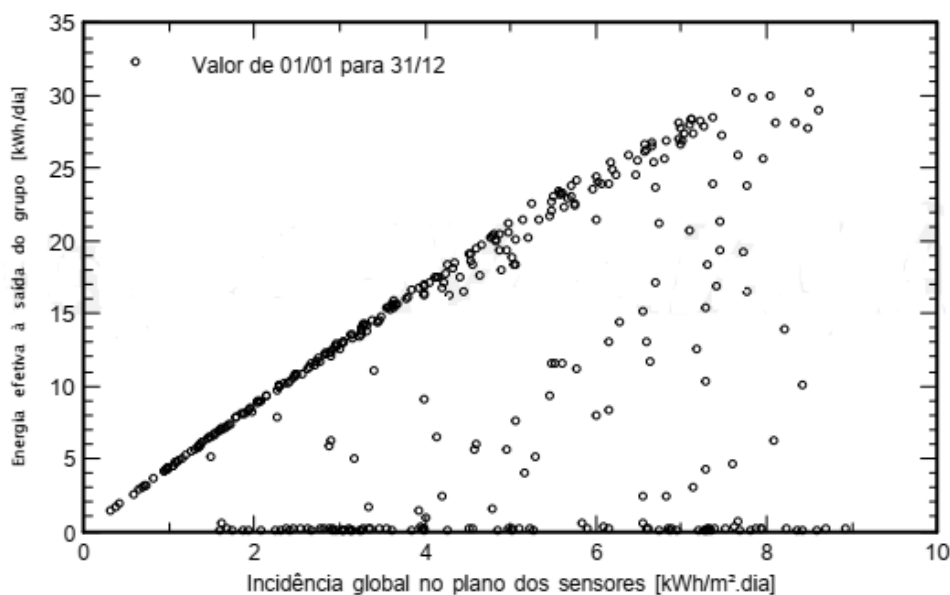
Quadro 5 - Balanço energético e resultados principais da simulação pelo modelo Perez Meteororm

	GlobHor kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	E_Avail kWh	EUnused kWh	E_User kWh	E_Load kWh	SolFrac
Janeiro	160.3	135.3	526.4	175.5	304.1	304.2	1.000
Fevereiro	141.5	131.2	502.0	191.7	264.4	264.5	1.000
Março	128.8	128.5	500.5	190.8	290.9	290.9	1.000
Abril	107.5	120.7	469.2	159.5	277.7	277.7	1.000
Mai	94.2	115.1	465.8	131.5	304.2	304.2	1.000
Junho	83.3	111.6	451.5	122.7	277.6	277.7	1.000
Julho	96.5	125.0	501.4	191.5	291.0	290.9	1.000
Agosto	118.7	143.9	574.4	227.5	304.0	304.2	1.000
Setembro	122.9	128.8	514.8	220.6	264.4	264.5	1.000
Outubro	146.3	138.7	553.2	218.9	304.1	304.2	1.000
Novembro	174.8	150.3	592.7	271.5	290.8	290.9	1.000
Dezembro	157.4	131.5	528.7	225.6	277.8	277.7	1.000
Ano	1532.2	1560.4	6180.5	2327.3	3451.0	3451.5	1.000

Legendas: GlobHor Irradiação global horizontal E_User Energia fornecida ao consumidor
 GlobEff Global efetivo, corrigido para IAM e sombras E_Load Exigências de energia do consumidor
 E_Avail Energia solar disponível SolFrac Fração solar (Eutil / Eforneimento)
 EUnused Energia não utilizada (battery full)

Fonte: PVSYST (2023)

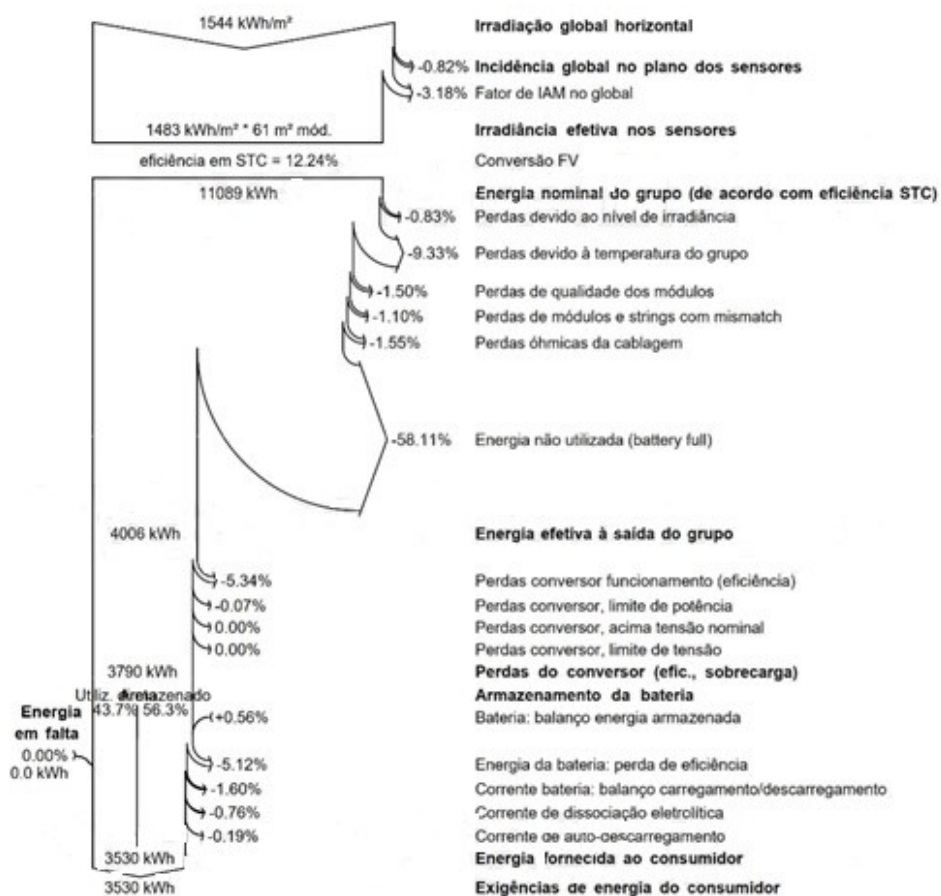
Gráfico 12 - Entrada diária x produção efetiva solar diária



Fonte: PVSYST (2023)

Na Figura 13 é ilustrada a distribuição de perdas de energia solar ao longo do ano.

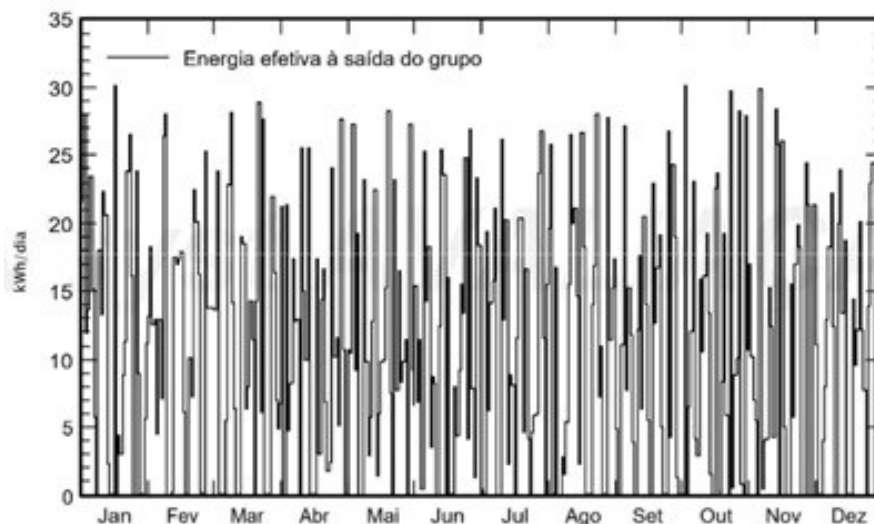
Figura 13 - Diagrama de perdas anuais



Fonte: PVSYST (2023)

O Gráfico 13 ilustra a instabilidade na produção de energia fotovoltaica durante os meses do ano e horários previstos de simulação: das 9h às 15h diariamente.

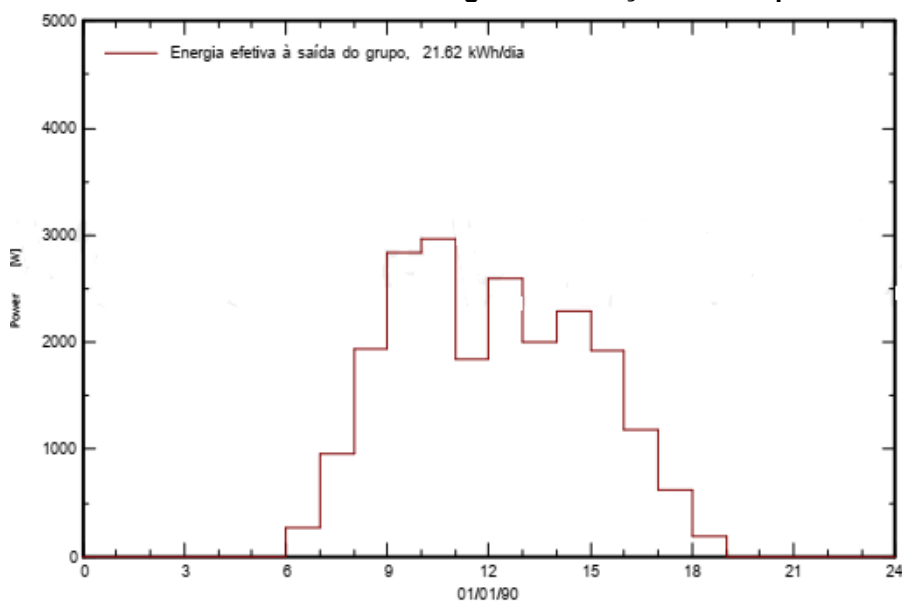
Gráfico 13 - Produção diária de energia: distribuição mensal



Fonte: PVSYST (2023)

O Gráfico 14 demonstra como foi simulada a potência dos painéis fotovoltaicos, considerando-se o consumo requerido pelo compressor de 2,2kW durante o horário diário das 9h às 15h, em 60Hz de frequência do motor. Uma informação importante é que o uso de inversor solar permite o funcionamento do compressor em outros horários, até o limite inferior de 30Hz de frequência do motor.

Gráfico 14 - Saída efetiva de energia: distribuição horária prevista

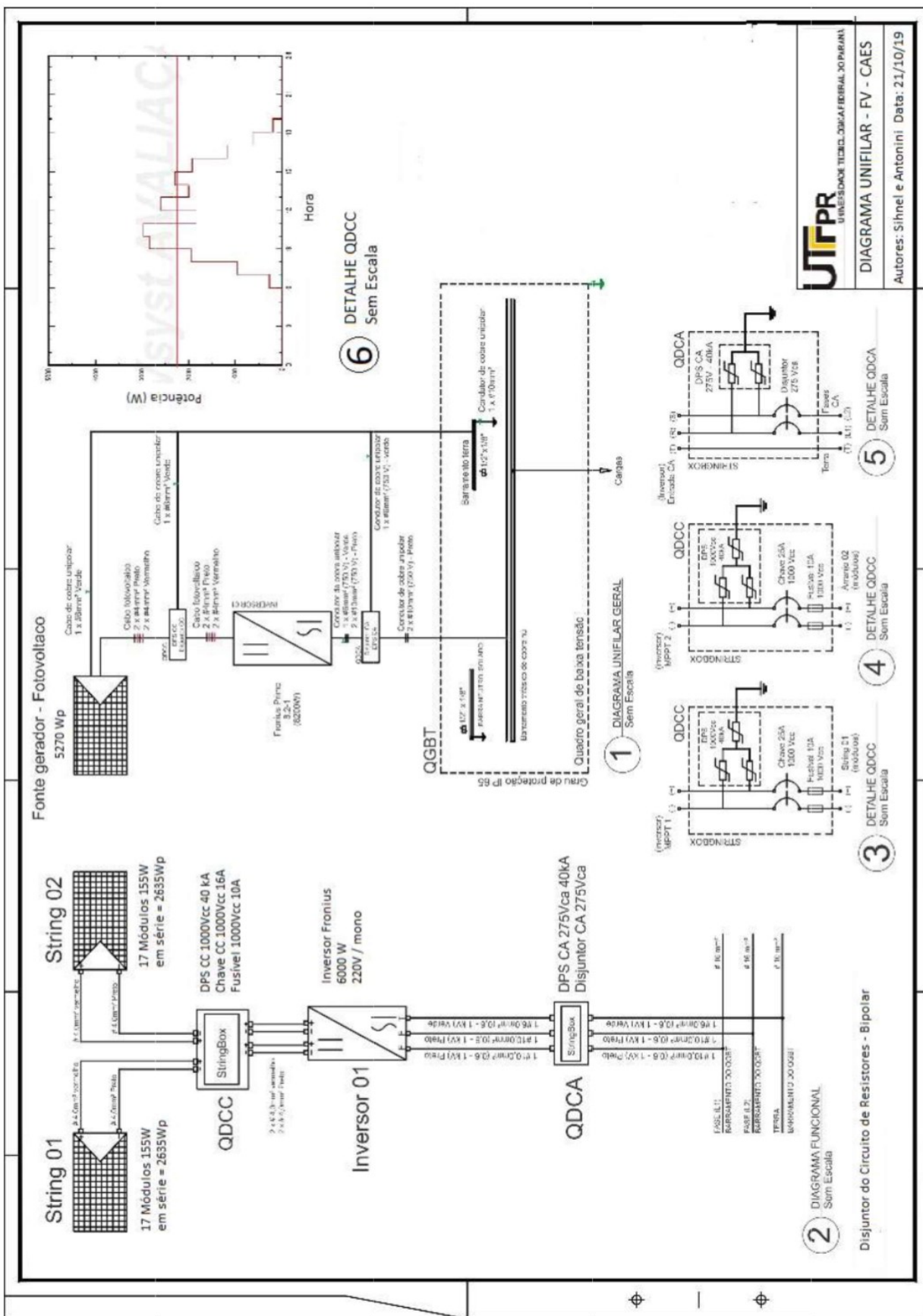


Fonte: PVSYST (2023)

A rotação do motor elétrico do compressor está diretamente relacionada com sua frequência e por isso a compressão de ar se dá mais vagarosamente, com vazão mássica de compressão menor. Como a vazão mássica é menor, há maior tempo de funcionamento do compressor para enchimento do reservatório, inversamente proporcional a frequência de acionamento do motor.

A Figura 14 ilustra o diagrama unifilar como projeto elementar do sistema fotovoltaico em questão. Os painéis fotovoltaicos foram ligados em dois conjuntos (*strings*) fornecendo energia elétrica para o quadro de comando de corrente contínua (QDCC) onde serão instaladas as proteções. Após sua passagem pelo QDCC, a corrente e a tensão são retificadas pelo inversor de frequência, que também faz a coleta da corrente elétrica, tensão e potências operacionais fornecidas ao compressor de ar pelo quadro de comando de corrente alternada (QDCA). Adicionalmente a Figura 28 ilustra a forma de ligação com o motor elétrico do compressor de ar utilizado para encher o reservatório de ar comprimido.

Figura 14 - Diagrama unifilar de ligações dos painéis fotovoltaicos



Fonte: Autoria própria (2023)

3.6.2 Montagens eletromecânicas e construções civis

As Fotografias 1 e 2 mostram o local selecionado para implantação da casa de máquinas do sistema de compressão, armazenamento e regeneração mecânica e elétrica do Sistema A-CAES proposto. Esse local é a parte externa do Bloco J1 do Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR Ponta Grossa.

Fotografia 1 - Localização selecionada para instalação da casa de máquinas: visão geral



Fonte: Autoria própria (2023)

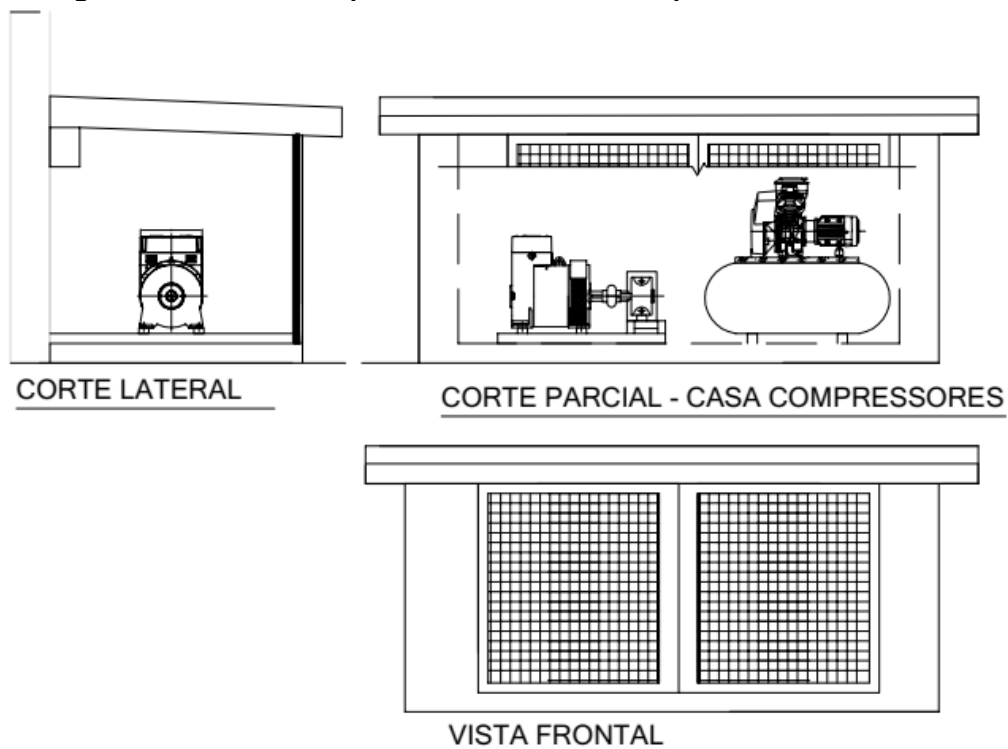
Fotografia 2 - Localização selecionada para instalação da casa de máquinas: vista lateral



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 15 mostra um desenho esquemático com vistas e cortes do espaço destinado à casa de máquinas enquanto a Fotografia 3 mostra esse local após sua construção. Trata-se de uma parte da instalação do Sistema A-CAES UTFPR Ponta Grossa, mostrando a casa de máquinas de compressão, reservatório de ar comprimido e reeração da turbina acoplada ao gerador síncrono.

Figura 15 - Desenho esquemático da casa de máquinas: vistas e cortes



Fonte: Autoria própria (2023)

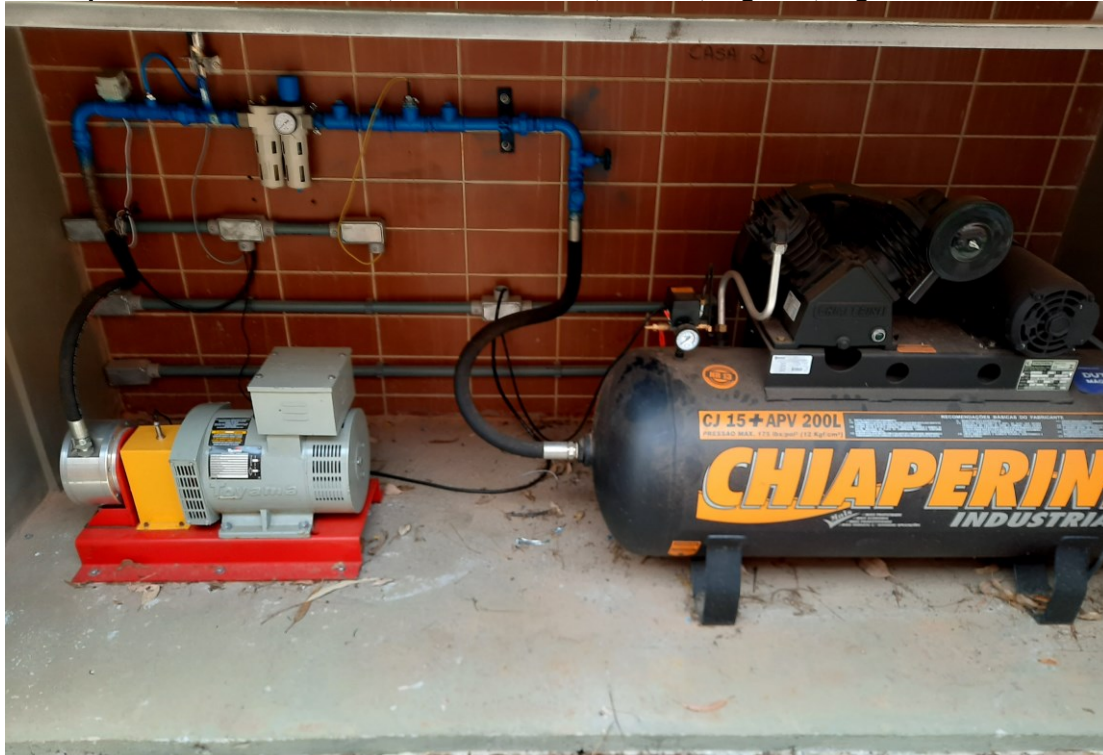
Fotografia 3 - Casa de máquinas



Fonte: Autoria própria (2023)

Nessa casa de máquinas ficam a linha de alimentação da turbina, válvula de controle, pressostato, sensor de temperatura na linha, sensor eletrônico de pressão (IFM™), válvulas de bloqueio, conexões flexíveis além dos equipamentos anteriormente mencionados - Fotografia 4. Através de conduítes, os cabos de força e sinal passam para a parte interna da edificação, indo até o painel de comando, onde estão o CLP, o inversor e demais componentes dos quadros de comando de corrente contínua (interligado aos painéis fotovoltaicos) e corrente alternada (integrado à casa de máquinas e sensores).

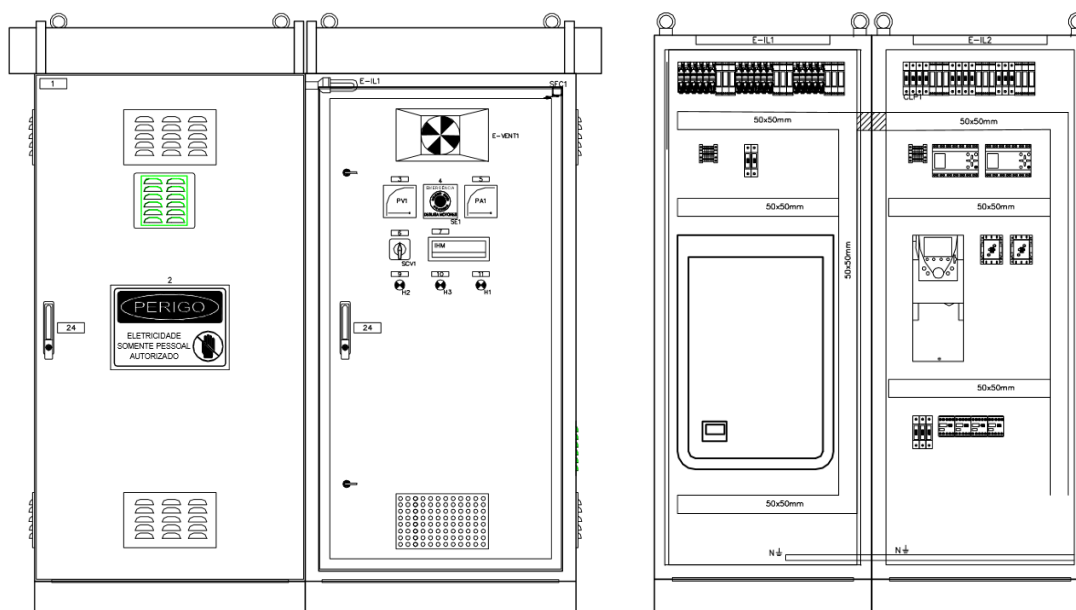
Fotografia 4 - Casa de máquinas: compressor, reservatório, turbina, alternador elétrico, sistema pneumático de controle, válvula elétrica, válvula, registro, regulador e lubrificador



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 16 ilustra esquematicamente o quadro de comando e seu gabinete com o inversor, CLP, dispositivos de proteção do QDCC, disjuntores, sinalizadores de operação e botoeiras de acionamento, bem como o dispositivo de segurança emergencial. Maiores informações serão fornecidas nas seções posteriores.

Figura 16 - Quadro de comando e seu gabinete com dispositivos



Fonte: Aurtoria própria (2023)

3.6.3 Características dos painéis fotovoltaicos instalados

Na Fotografia 5 é mostrada uma vista dos painéis fotovoltaicos instalados no telhado do Bloco J1 do DAMEC UTFPR Ponta Grossa. Essa captação fotovoltaica foi montada em dois grids, sendo 10 painéis fotovoltaicos de 150W e 24 painéis fotovoltaicos de 170W, perfazendo um total de 5,58kWp, podendo atender ao longo do dia a carga solicitada pelo compressor, conforme distribuição diária. Importante ressaltar que o inversor permite o motor do compressor trabalhar com uma frequência menor que 60Hz, podendo assim, estender o horário de uso da energia solar.

Fotografia 5 - Conjunto de painéis fotovoltaicos instalado no Bloco J1 da UTPFR/Ponta Grossa



Fonte: Dimbarre (2021)

Os painéis fotovoltaicos instalados, foram de dois modelos e fabricantes diferentes, pois foram adquiridos com recursos do Governo Federal por meio de dois diferentes processos licitatórios. Os painéis fotovoltaicos com 150W são da marca Yingli Energy™ e modelo YL150P-17H enquanto os painéis fotovoltaicos com 170W são da marca Upsolar™ e modelo UP-M170P. As especificações técnicas dos painéis fotovoltaicos com 150 Wp e 170Wp instalados, são mostradas nas Tabelas 18 e 19, respectivamente.

Tabela 15 - Dados técnicos dos painéis fotovoltaicas de 150W

Dados Técnicos dos painéis fotovoltaicos de 150W	
Fabricante	Yingli Energy™ (China)
Modelo do painel	YL150P-17H
Classe de aplicação	A
Potência nominal	150 W ($\pm 5\%$)
Corrente nominal	8,12 A
Proteção (fusível ou disjuntor)	15 A
Corrente de circuito aberto	22,90 A
Corrente de curto circuito	8,61 A
Tensão máxima do sistema	600 V
Eficiência Energética	17,2 %
Área externa do módulo (m ²)	1,00
Produção Média Mensal: (kW-h/mês)	18,75
Potência nas condições padrão (W)	150
Quantidade	10 painéis

Fonte: Yingli Energy (2023)

Tabela 16 - Dados técnicos dos painéis fotovoltaicas de 170W

Dados Técnicos dos painéis fotovoltaicos de 170W	
Fabricante	Upsolar™ (EUA)
Modelo do painel	UP-M170P
Classe de aplicação	A
Potência nominal	170 W ($\pm 3\%$)
Corrente nominal	8,88 A
Corrente de circuito aberto	24,40 A
Corrente de curto circuito	9,10 A
Tensão máxima do sistema	1000 V
Eficiência Energética	17,2 %
Área externa do módulo (m ²)	0,99
Produção Média Mensal: (kW-h/mês)	21,26
Potência nas condições padrão (W)	170
Quantidade	24 painéis

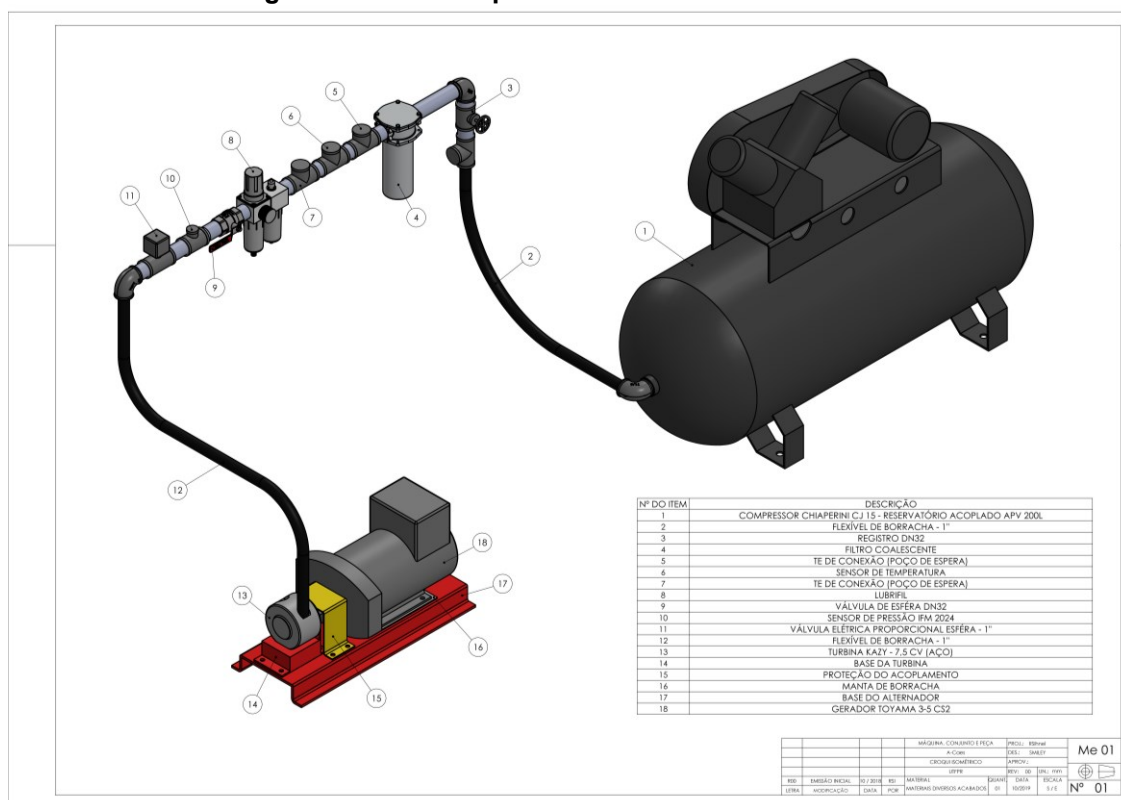
Fonte: Upsolar (2023)

Esses painéis fotovoltaicos foram montados sobre a estrutura do telhado do Bloco J1 em duas matrizes mistas, de tal forma que os painéis fotovoltaicos formem ligações elétricas preservando suas características e as do inversor, especialmente a tensão máxima do sistema (nesse caso, 600V) e a menor corrente de curto circuito de cada modelo dos painéis fotovoltaicos.

3.6.4 Croqui pneumático do sistema A-CAES

Na Figura 17 apresenta-se um croqui pneumático do Sistema A-CAES implantado no Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética (LabMPEE) da UTFPR campus Ponta Grossa. Os componentes são o compressor alternativo selecionado e instalado, bem como seu reservatório de ar comprimido acoplado, linha pneumática com acoplamentos flexíveis, registro mecânico do tipo WOG (*water, oil and gas*, para uso com água, óleo e gases), filtro secador, conjunto lubrificador (lubrificador, regulador automático e filtro), local de instalação dos sensores de pressão e temperatura, válvula de bloqueio tipo um quarto de volta com obturador do tipo esfera e válvula eletrônica de fechamento e abertura com atuador elétrico comandado pelo CLP.

Figura 17 - Sistema pneumático do Sistema A-CAES



Fonte: Autoria própria (2023)

Adicionalmente a Figura 17 está ilustrado esquematicamente uma base de assentamento do conjunto de regeneração, onde estão a turbina pneumática de 7,5HP e o gerador síncrono acoplados com a rede pneumática de alimentação, e entre si, através de acoplamento elástico. Esse conjunto deve estar nivelado e com eixos alinhados.

a) Compressor:

Como mencionado anteriormente, foi adquirido um compressor Chiaperini™, modelo CJ15, com 12bar de pressão máxima, com reservatório de 200 litros (APV 200L) e com vazão volumétrica de 424 L/min (Fotografia 6). As suas principais características técnicas nominais estão apresentadas nas Tabelas 5 e 8.

Fotografia 6 - Compressor selecionado e instalado



Fonte: Autoria própria (2023)

b) Vaso de pressão (reservatório):

A estocagem de ar comprimido foi realizada no próprio reservatório do compressor Chiaperini™. Os dados técnicos desse reservatório de ar comprimido acoplado encontram-se na Fotografia 7. Há uma diminuição significativa do volume de ar reservado inicialmente proposto para o presente sistema, porém essa diferença não interfere no princípio de funcionamento do Sistema A-CAES.

Fotografia 7 - Dados nominais do vaso de pressão acoplado ao compressor selecionado e instalado

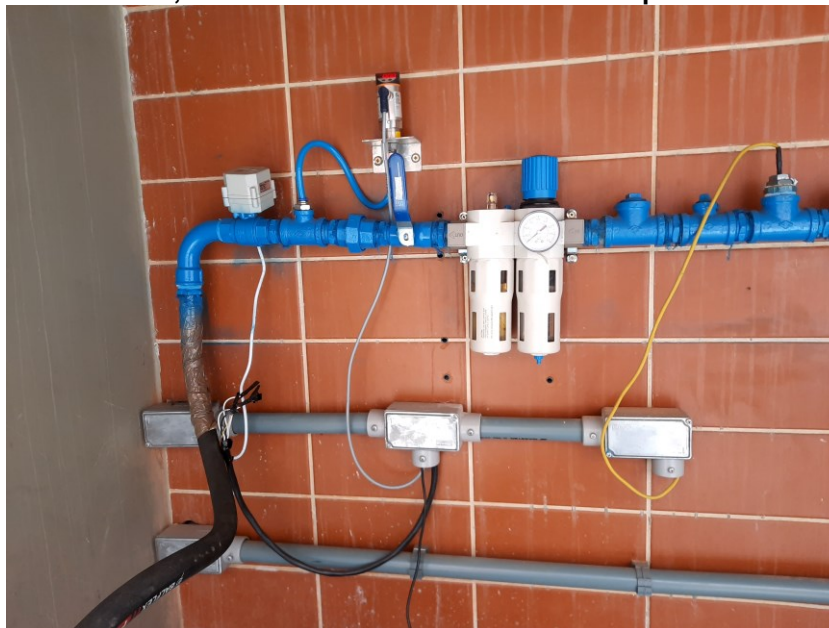


Fonte: Chiaperini (2021)

c) Acessórios pneumáticos e reguladores

Como mencionado anteriormente, foram inseridos no projeto pneumático do Sistema A-CAES, reguladores de pressão, lubrificadores de ar comprimido, silenciador, válvula elétrica proporcional derivativa, 4mA a 20mA para controle do fluxo, válvula esfera de fecho rápido, registro gaveta, sensor de pressão eletrônico IFM™ como mostrado na Fotografia 8.

Fotografia 8 - Acessórios pneumáticos instalados: filtro coalescente, sensor de pressão IFM™, lubrifil, válvula elétrica PID e sensor de temperatura



Fonte: Autoria própria (2023)

Posteriormente, no acoplamento entre a turbina pneumática e o gerador elétrica foi inserido um termopar para registro de temperatura e um leitor de rotações. Essa instalação é mostrada na Fotografia 9. Esse sensor de rotação visa manter o controle da rotação síncrona do conjunto de regeneração, por leitura ótica da velocidade angular do eixo acoplado da turbina com o gerador elétrico. Esse gerador tem a rotação fixa para poder cogerar a energia elétrica com a qualidade necessária e requisitada pela rede de distribuição. Integrado ao CLP é um dos sensores que controla a abertura ou fechamento da válvula eletrônica.

Fotografia 9 - Sensor de rotação (velocidade angular) instalado no eixo da turbina pneumática



Fonte: Autoria própria (2023)

3.6.5 Projeto do comando elétrico

Para instalação do sistema elétrico foi realizado um projeto elétrico e de automação, onde ficam especificados os comandos, controles e diagramas de força. O objetivo principal é orientar as instalações elétricas de comando do Sistema A-CAES visando o controle de fluxo elétrico e leituras operacionais de variáveis para quantificar e qualificar o resultado do aparato experimental proposto nessa Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.

1) Descrição geral do projeto elétrico:

O projeto de painel elétrico com gabinete e componentes, mostrado esquematicamente na Figura 16, visa o controle, medição e armazenamento de dados de sistema de regeneração elétrica e de sistema fotovoltaico, procurando-se à aquisição de dados de bancada experimental instalada na edificação do Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética (LabMPEE) vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Ponta Grossa. A potência geral instalada foi de 5,9kW elétricos. Esse sistema é composto basicamente por:

- a) um gabinete em aço, uso interno IP21, com porta com fecho triangular, acabamento em pintura em epóxi, com gaxetas de vedação, para assentamento em base de alvenaria a ser construída, com placa de fundo, barramento em cobre eletrolítico, placa de proteção em policarbonato, sistema de identificação de circuitos e componentes;
- b) componentes assentados em trilhos DIN™, fiações compatíveis (1,0mm² para comando e dimensionada para força), anilhas identificadores em cada cabo, cabos coloridos segundo o padrão ABNT, cabos de força 10,0mm², disjuntor para sistema de fluxo/tratamento/compressão de ar atmosférico (2,2kW, 220V trifásico) e para sistema de regeneração elétrica (3,5kVA, 220/127V), disjuntor geral de seccionamento (6kW);
- c) inversor de frequência solar WEG™ modelo CFW500, trifásico, 220V, acoplado aos painéis fotovoltaicos e transmitindo potência ao sistema de fluxo/tratamento/ compressão de ar (Fotografia 10);
- d) CLP WEG™ modelo PLC300 para controle lógico do sistema (Fotografia 10);
- e) botoeiras liga/desliga, lâmpadas de sinalização, IHM e CLP compatíveis com o sistema (Fotografia 11);
- f) contactores, válvula com acionamento remoto e sistema de controle da válvula elétrica proporcional -1" (Fotografia 12);
- g) sistema QDCC com *string* e *combiner box* (forma de montagem) - (Fotografia 12);
- h) Canaletas e trilhos DIN™;
- i) Programação do CLP.

Fotografia 10 - Inversor de frequência e CLP utilizados no Sistema A-CAES



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 11 - Comando do painel elétrico na porta do gabinete



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 12 - Disjuntores, disjuntor motor, contactores, *string box*, fonte 12V e indicador de rotações



Fonte: Autoria própria (2023)

O inversor de frequência, WEG™ CFW500, foi selecionado de acordo com a potência gerada pelo sistema fotovoltaico e saída para o sistema de corrente alternada que alimenta o motor do compressor, comandando boa parte dos controles elétricos. O CLP faz a integração do inversor de frequência com os sensores instalados na linha e no comando do compressor, reservatório, válvula eletrônica, sensor eletrônico de temperatura, corrente e tensão elétrica operacional (medidas pelo inversor). O CLP, WEG™ PLC300, também faz o armazenamento desses dados, bem como dos tempos de operação do compressor, da válvula eletrônica e também registra a curva de pressões (pela leitura do sensor eletrônico de pressão IFM™), desde o acionamento do sistema de regeneração até o seu desligamento.

O projeto elétrico do Sistema A-CAES é complementar para construção do aparato experimental em escala laboratorial, desde a fonte instável a ser regulada, sistema A-CAES em si (compressor, reservatório e regeneração mecânica através da turbina), até o uso final do sistema que é regulação pela regeneração elétrica (gerador e banco de resistências elétricas de controle). O gerador elétrico (alternador) utilizado no Sistema A-CAES em escala laboratorial foi o modelo TA3.5CS2 da marca

Toyama™. As principais características técnicas desse equipamento são mostradas na Figura 18.

Figura 18 - Dados técnicos do alternador (gerador) instalado





FICHA TÉCNICA

Alternador Monofásico

TA3.5CS2

Código do Produto 270-001

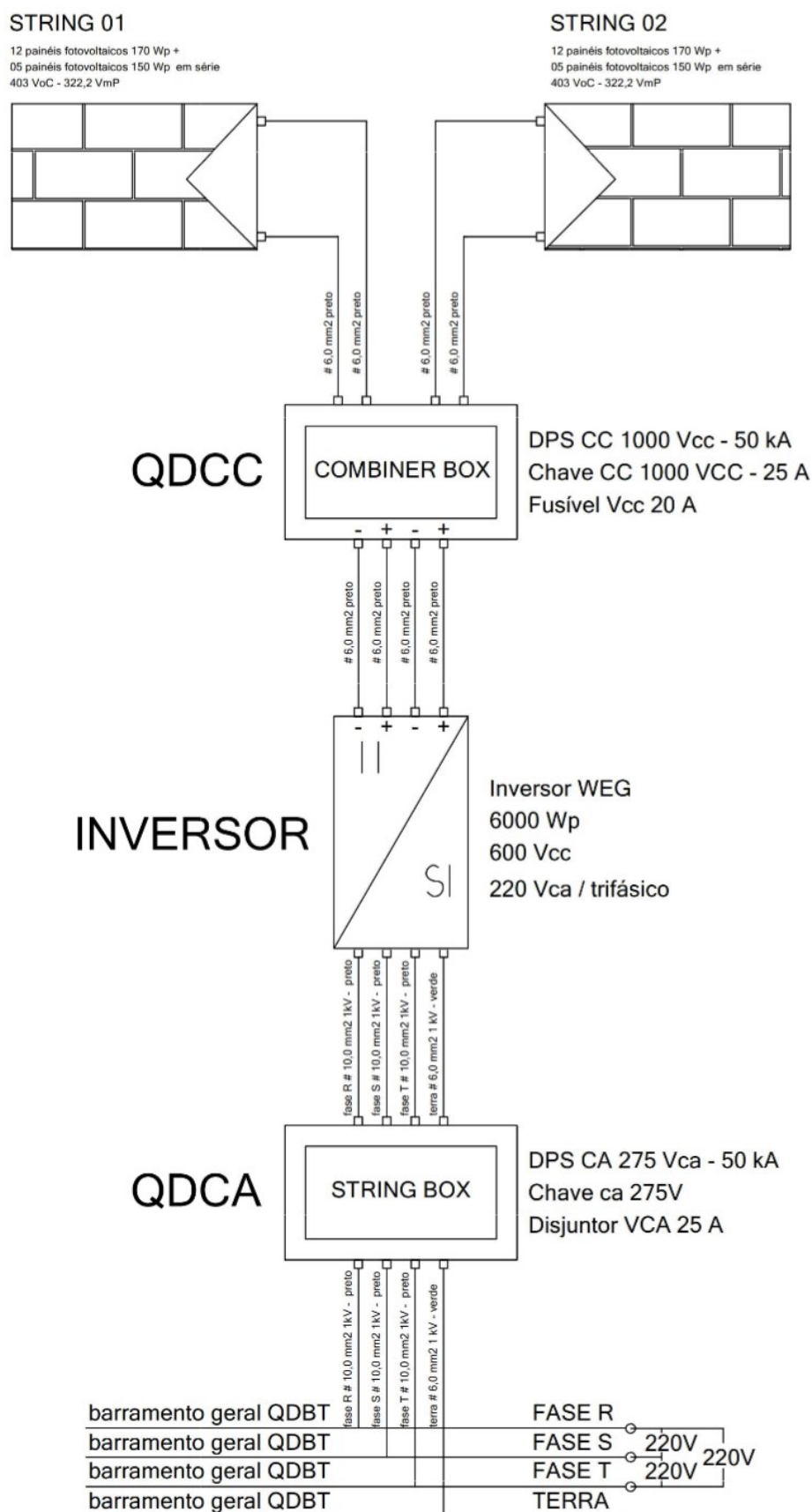
Informações Técnicas

Tipo	Compound
Potência	3,5 kW
Nº de fases	Monofásico
Tensão	110 V / 220 V
Frequência	60 Hz
Corrente máxima	31,8 / 15,9 A
Rotação	1800 rpm
Carcaça	132 mm

Fonte: Toyama (2021)

A Figura 19 ilustra o diagrama unifilar de força implantado para o sistema fotovoltaico, com as ligações dos painéis fotovoltaicos, proteções do QDCC, inversor de frequência e distribuição de força no QDCA. A Figura 20 ilustra a lista de símbolos padrão para utilização do projeto elétrico.

Figura 19 - Croqui elétrico de geração fotovoltaica



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 20 - Lista de símbolos elétricos

Visão geral de símbolos

IEC_symbol

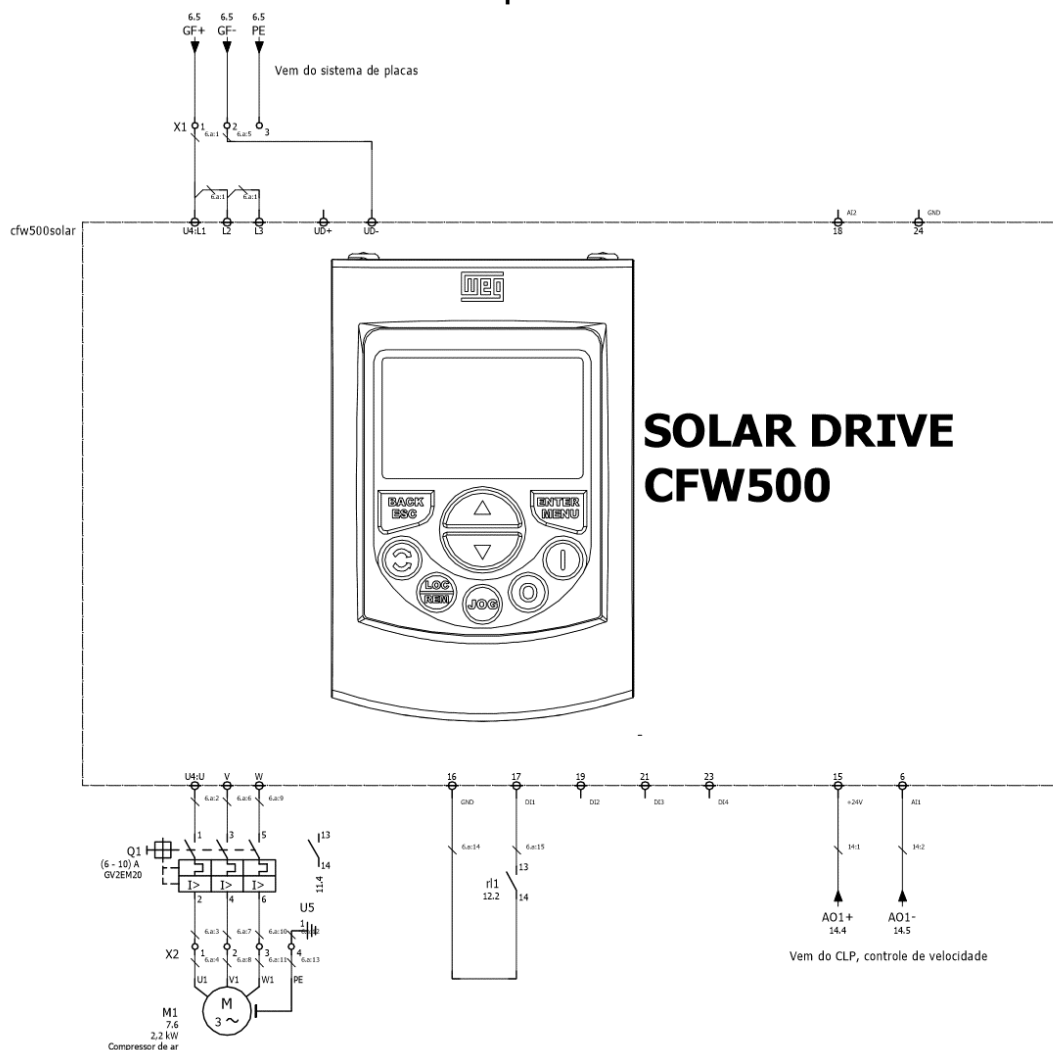
F25_001 - Cópia

0 SL Contato de Força - contato NA de um contador Contato NA de força		116 RE Elemento de aquecimento Aquecimento, 2 pontos de conexão		327 FS1 Interruptor com fusível, monopolar Seccionadora fusível, simples	
1 S Contato de contato NA Contato NA, contato auxiliar		121 FA2 Dejuntor, bipolar Dejuntor duplo		1117 X2 Borne Borne, geral, com barra de ponte, 2 pontos de conexão	
20 K Accionamento eletromecânico, geral / bobina do relé geral Bobina para dejuntor de motor		124 QL3 Dejuntor motor / chave de sobrecarga do motor com mecanismo de interruptor sem linha Chave de sobrecarga do motor, tripolar		1200 PE_M Ponto de conexão PE para motor PE Ponto de conexão do dispositivo	
33 XF Borne fusível Borne, geral, 2 pontos de conexão		150 SONOT2 Interruptor de parada de emergência / botão de parada de emergência, contato NF, com girar para liberar Botão de apertar, contato NF		1204 M2AIR Motor de corrente alternada, ventilador / exaustor Motor com um enrolamento sem PE	
56 G22 Retificador, monofásico Retificador, variável		300 ERDE Terra, geral PE Ponto de conexão do dispositivo		1219 SSEND Interruptor fim de curso, Contato NA Interruptor fim de curso, Contato NA	
65 BT Elemento térmico Sensor analógico, 2 pontos de conexão		307 M3_1 Motor de indução trifásico, um número de rotações Motor trifásico		1304 SW2RR_1 Interruptor, comutador (2 caminhos), acionamento através de rotação Interruptor, comutador	
74 B Gerador de impulsos Gerador, variável		313 EH2 Lâmpada fluorescente sem PE Buminação, 2 pontos de conexão		1339 FA2_2 Dejuntor, dois pólos, forma 2 Dejuntor duplo	
85 RV Resistor, dependente de tensão / varistor Resistor, simples		322 FS2 Interruptor com fusível, bipolar Seccionadora fusível, duplo		1372 BW3P Interruptor de pressão, comutador (3 caminhos) Interruptor, comutador	

Fonte: IEC™ (2021)

A Figura 21 mostra um diagrama simplificado do sistema de captação de energia fotovoltaica até o acionamento do motor do compressor.

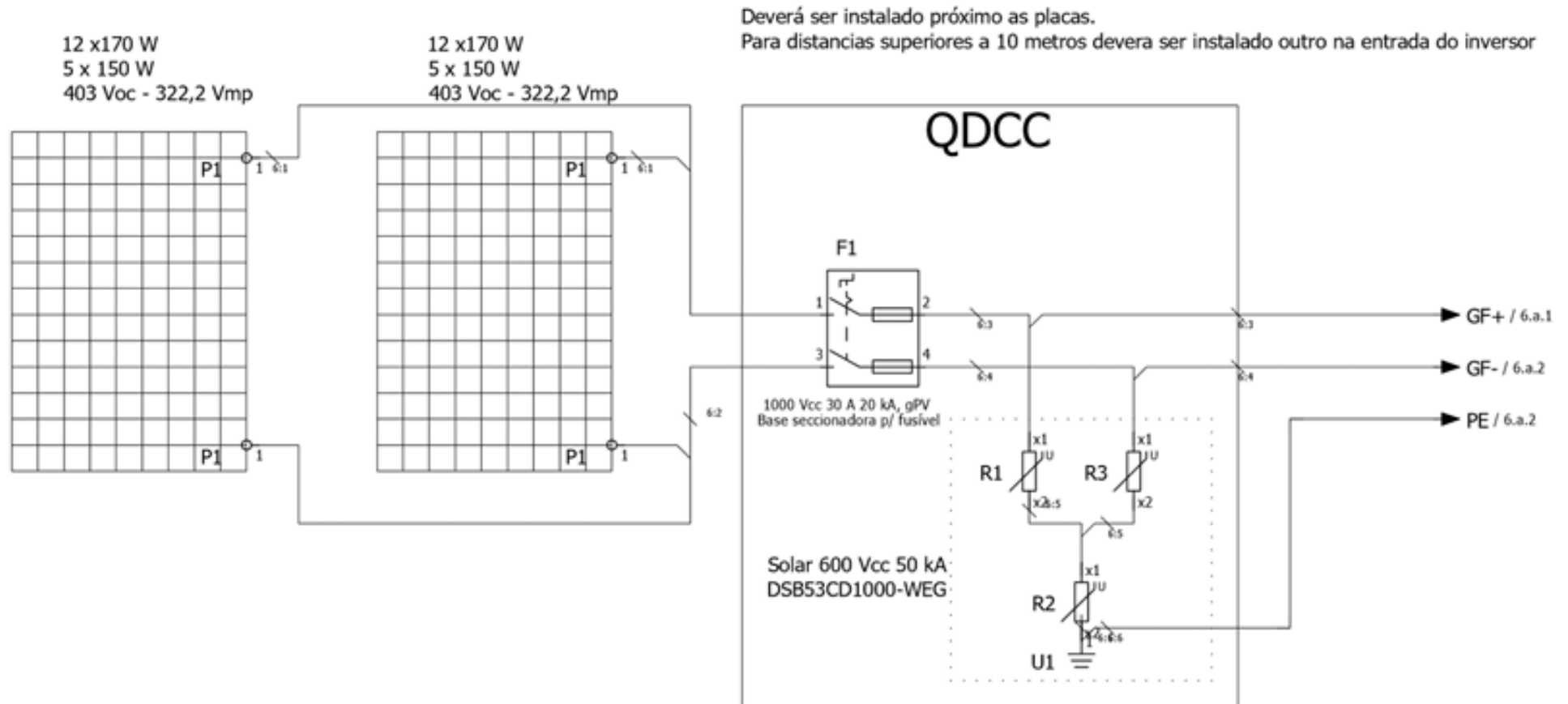
Figura 21 - Diagrama simplificado do sistema de geração solar, inversor e comando simplificado



Fonte: Autoria própria (2023)

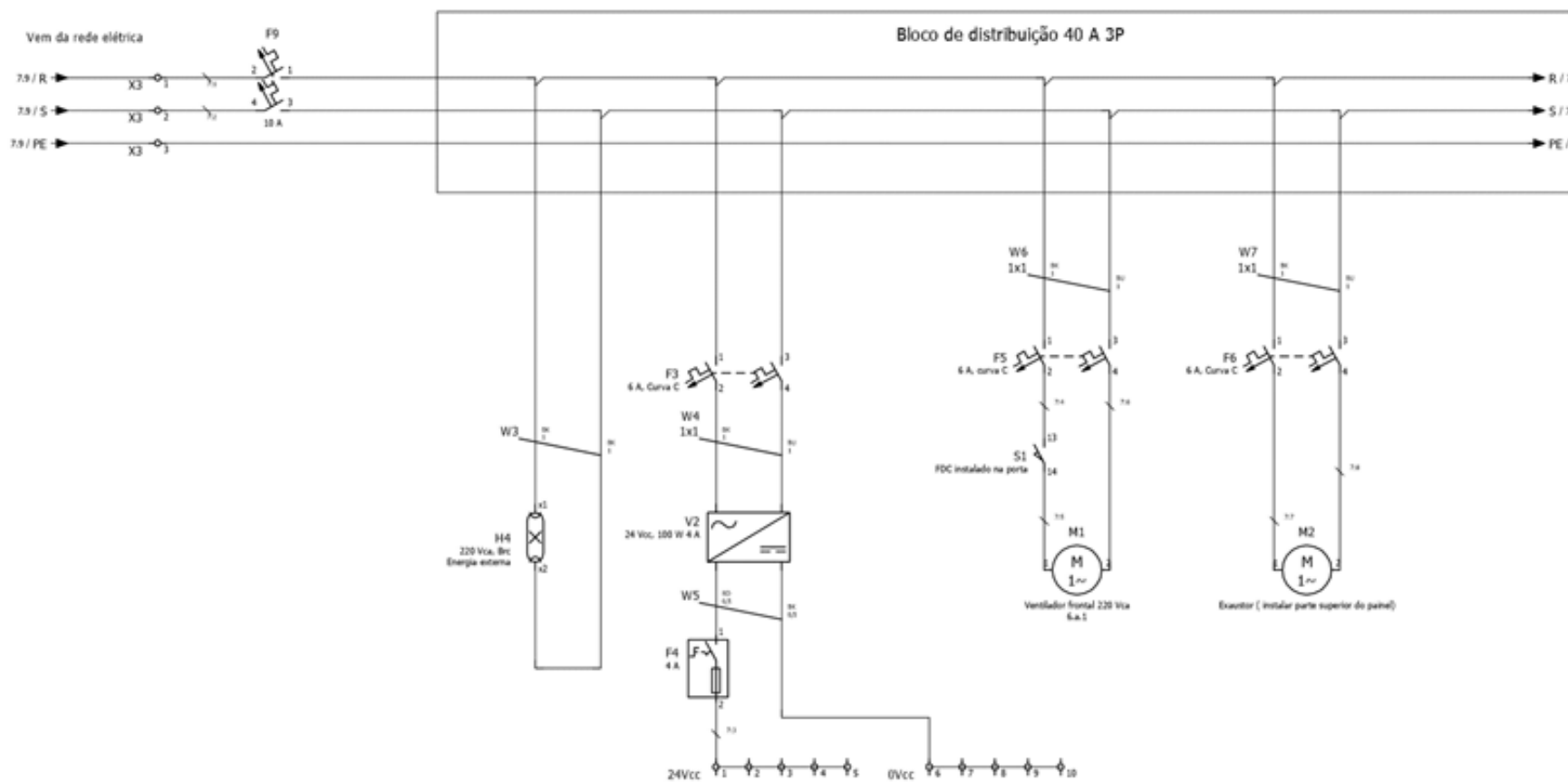
A Figura 22 mostra a forma de montagem da ligação elétrica dos painéis fotovoltaicos (de forma mista) e as proteções existentes no inversor solar enquanto que a Figura 23 mostra as ligações do inversor de frequência e as alimentações do exaustor e ventilador usado no gabinete para resfriamento dos componentes elétricos existentes.

Figura 22 - Sistema elétrico de geração fotovoltaica: proteções do QDCC



Fonte: Autoria própria (2023)

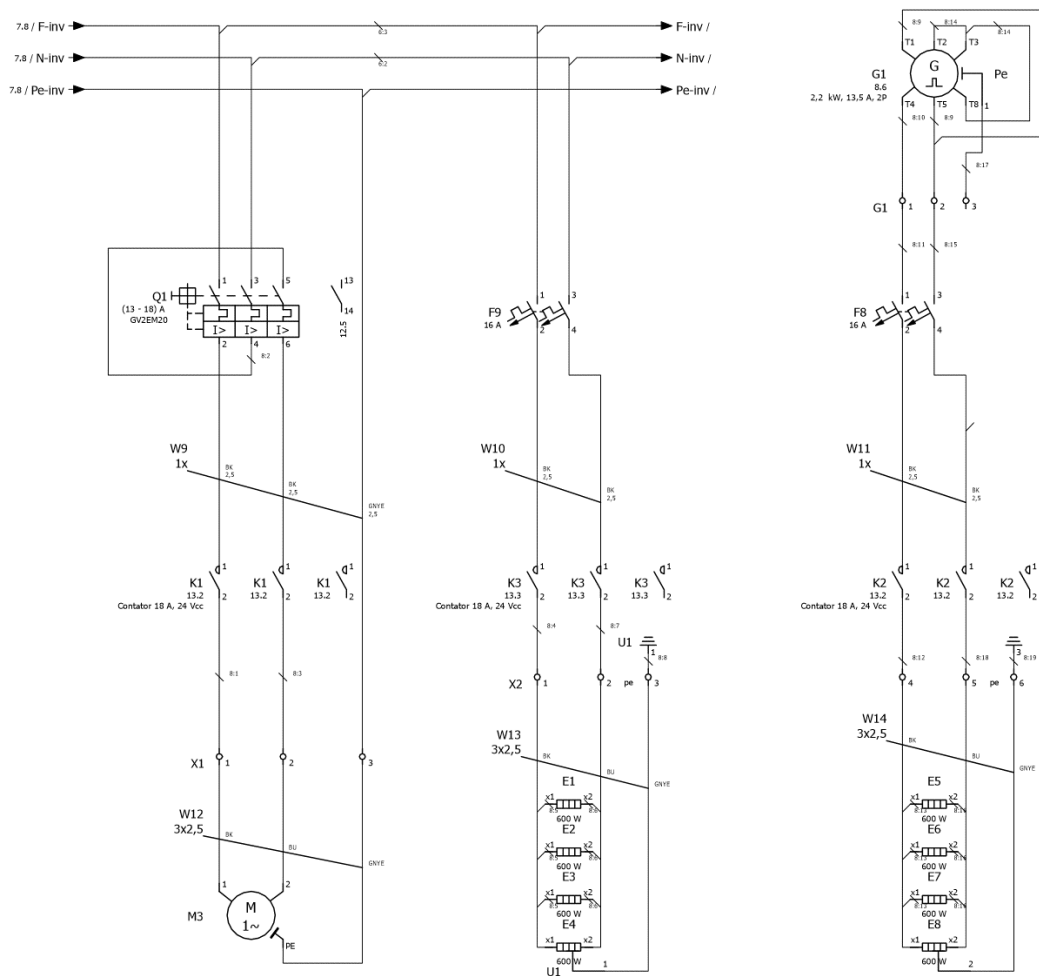
Figura 23 - Quadro geral de baixa tensão: QDCA, ventiladores e fonte 24VCC



Fonte: Autoria própria (2023)

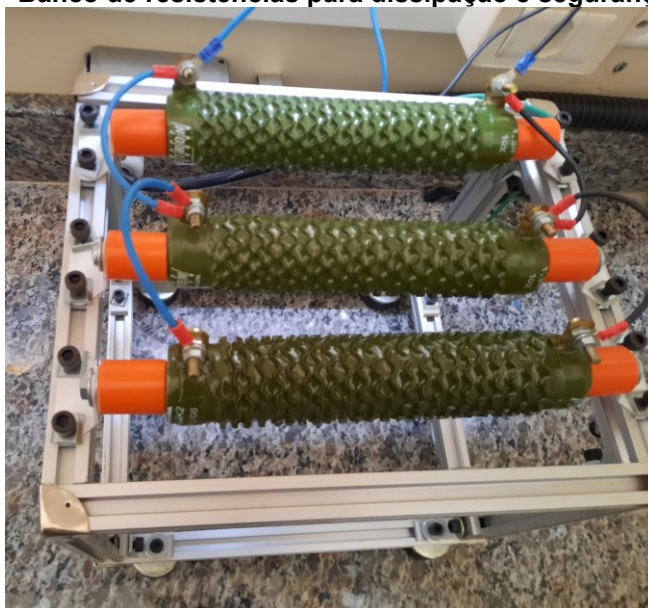
A Figura 24 mostra as ligações elétricas de comando por contactor do motor elétrico do compressor e da alimentação das resistências elétricas. Em relação ao comando das resistências elétricas, elas estão intertravadas com a geração elétrica do gerador, como dispositivo de segurança e dissipação. Na Fotografia 13 é mostrada uma vista desse banco de resistências. Este intertravamento é necessário para que o gerador não “opere em vazio” (sem carga) e também atua como dispositivo de segurança. Quando ocorre o funcionamento do gerador sem carga, a eficiência do sistema não é real, pois está apenas exercendo trabalho sobre o rotor da turbina e do gerador (momentos de inércia apenas). Quando é aplicada a carga sobre o gerador inicia-se os controles de rotação síncrona e o trabalho sobre o sistema de regeneração aumenta, tendo valores reais de energia de regeneração.

Figura 24 - Croqui elétrico de alimentação do motor do compressor e das resistências elétricas



Fonte: Autoria própria (2023)

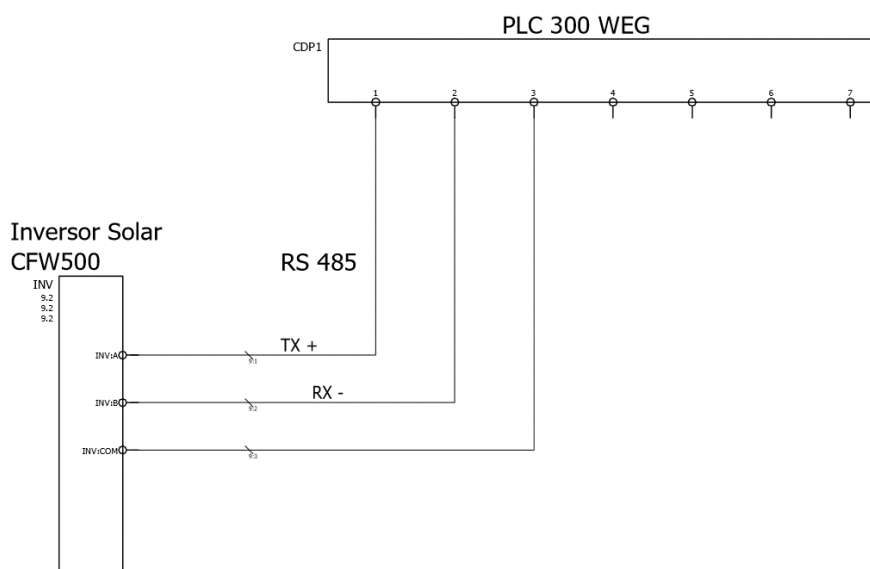
Fotografia 13 - Banco de resistências para dissipação e segurança operacional



Fonte: Autoria própria (2023)

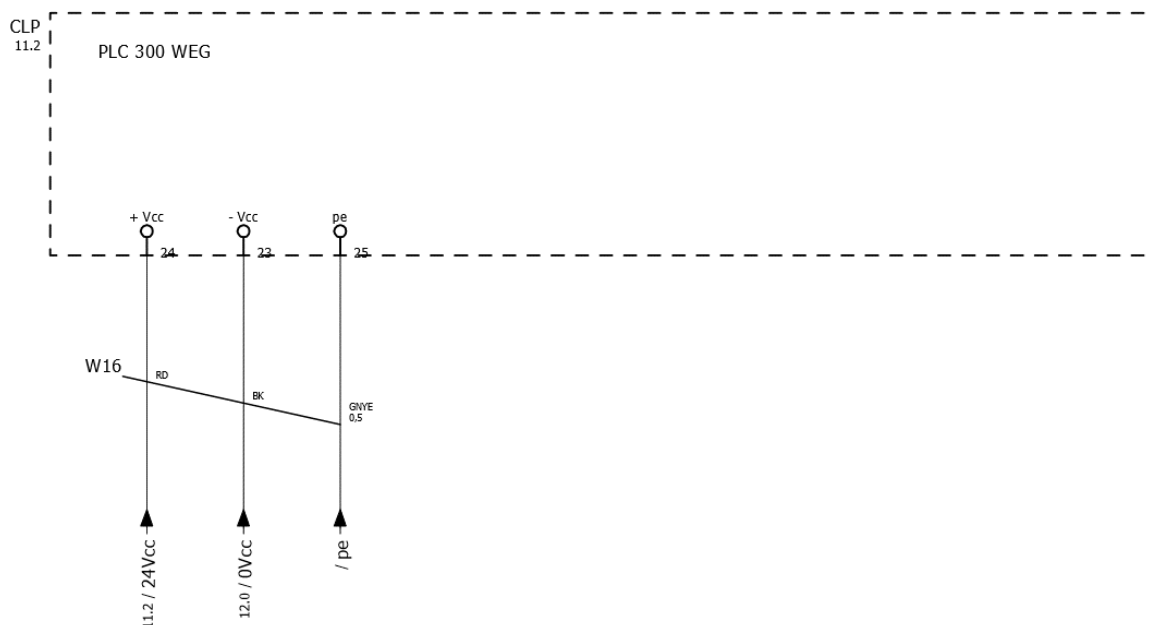
As Figuras 25 e 26 mostram diagramas esquemático da forma de ligação do CLP. Na Figura 25 são mostrados os bornes de ligação para comunicação via protocolo RS485 (*Ethernet*) com o inversor de frequência solar, onde é realizada a transferência de leitura das variáveis de corrente, tensão e tempo para registro no CLP (cartão de memória) enquanto que na Figura 26 é mostrada a forma de alimentação elétrica do CLP (vindo da fonte).

Figura 25 - Croqui comunicação do CLP com inversor solar (registro de variáveis)



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 26 - Croqui alimentação elétrica do CLP

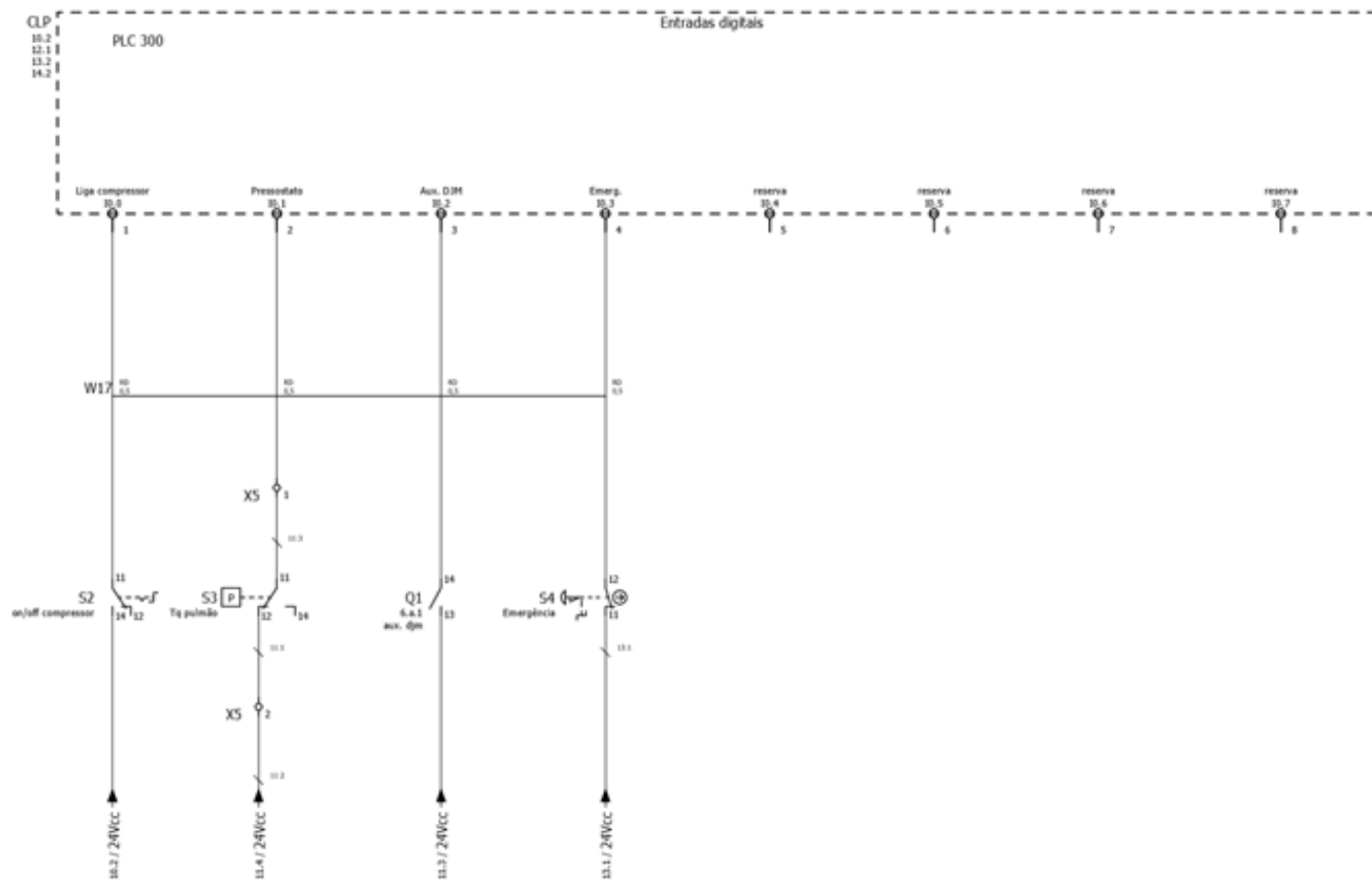


Fonte: Autoria própria (2023)

As Figuras 27 e 28 ilustram de que forma os sensores devem ser ligados ao CLP. Nota-se que são três entradas analógicas de 4mA a 20mA e quatro entradas digitais (*on/off*). Nas entradas analógicas são ligadas a válvula eletrônica de saída proporcional derivativa e os sensores de pressão e temperatura enquanto que nas saídas digitais são ligados os pressostatos, leitor de rotação, botoeira liga/desliga e sensor de emergência.

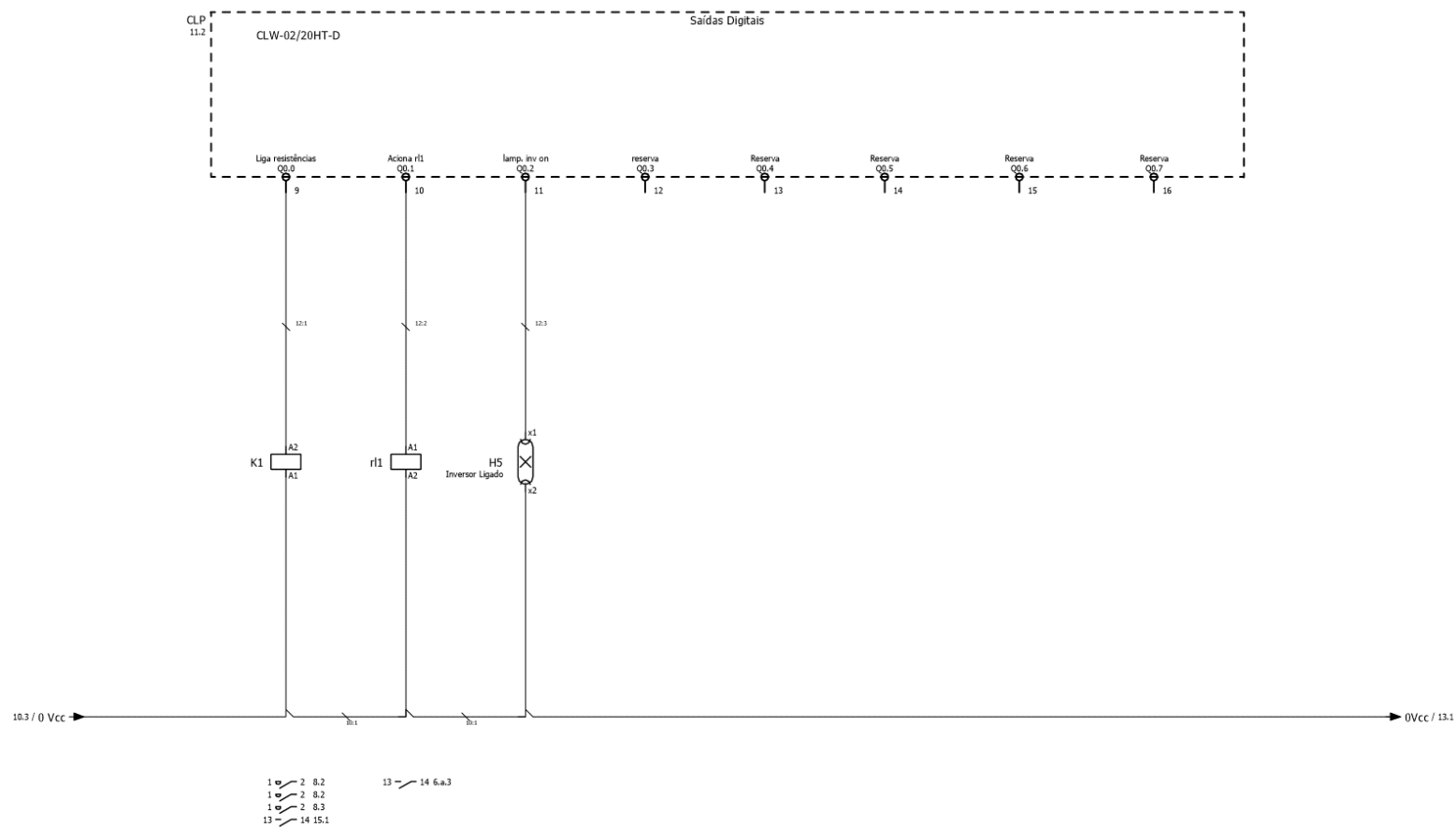
As Figuras 29 e 30 apresentam os diagramas esquemáticos dos comandos utilizados para acionamento do compressor, tais como pressão do reservatório. As entradas analógicas fazem o controle derivativo proporcional sobre a pressão e a vazão que será utilizada na turbina pneumática. A Figura 31 ilustra esquematicamente apenas a forma de ligação dos sinalizadores óticos do gabinete enquanto que a Figura 32 ilustra esquematicamente o cartão adicional do CLP para coleta de dados que serão armazenados em relatórios de planilhas MicrosoftTM Excel para utilização como dados experimentais preliminares (armazenamento e coleta de dados automáticos).

Figura 27 - Entradas digitais do CLP



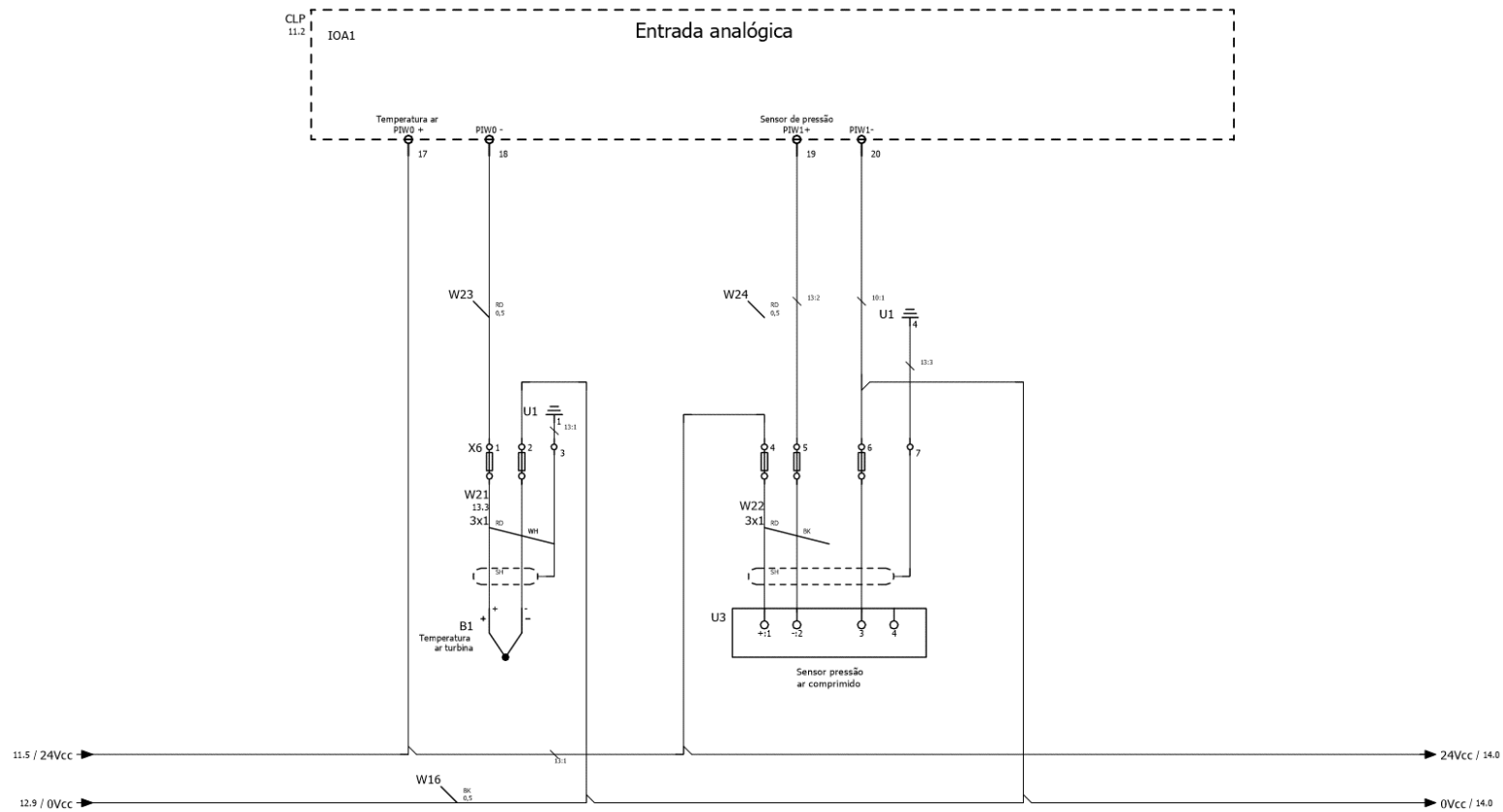
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 28 - Saídas digitais do CLP: comando do compressor



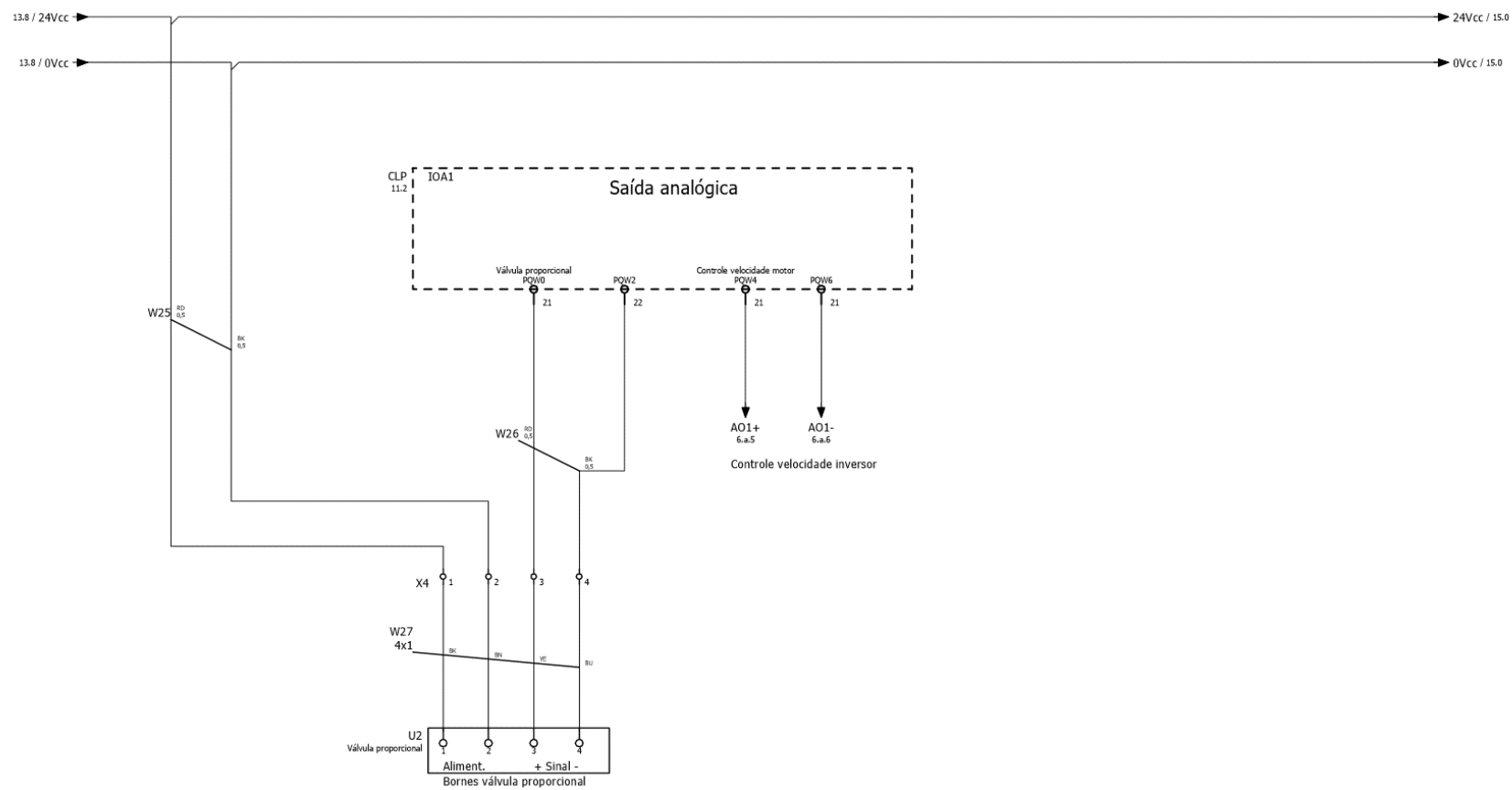
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 29 - Entradas analógicas do CLP: sinal do sensor de pressão



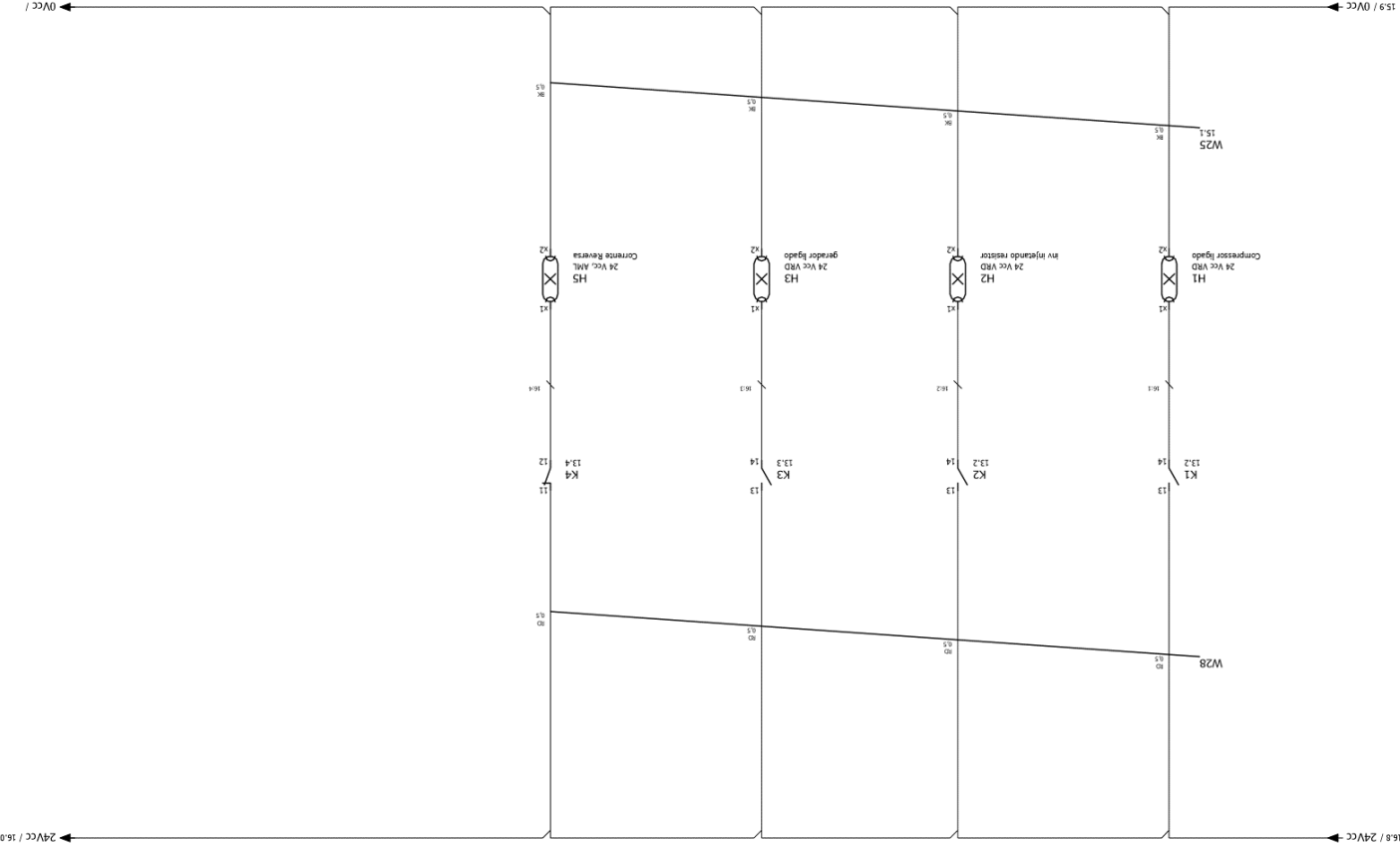
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 30 - Saída analógica do CLP: controle da válvula elétrica

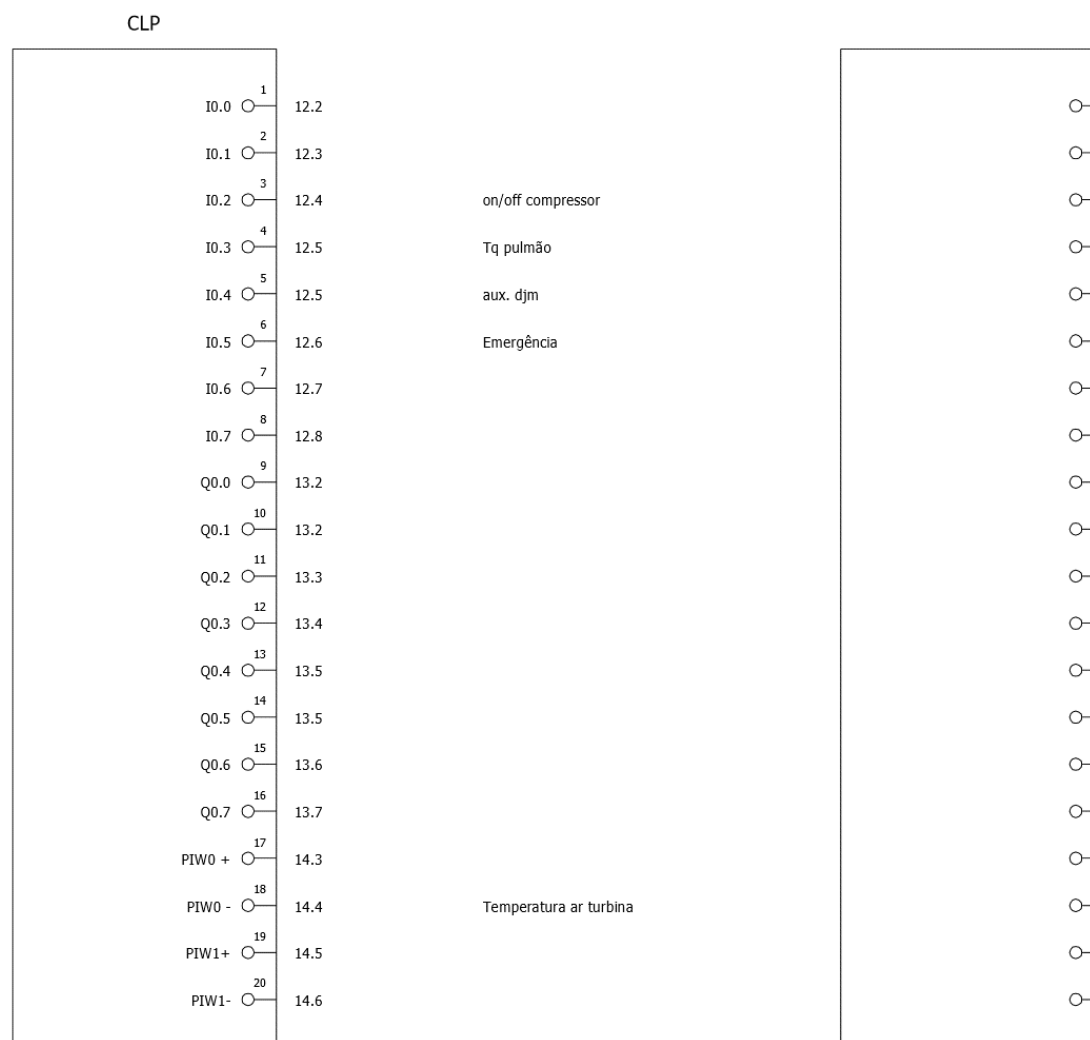


Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 31 - Sinalizações de funcionamento



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 32 - Vista geral dos cartões do CLP: diagrama de bornes

Fonte: Autoria própria (2023)

2) Descrição operacional do projeto elétrico implantado:

O sistema elétrico composto por gabinete, quadro de comando e força, painéis fotovoltaicos, inversor solar, inversor de comando, CLP, visa a operação e registro de dados pelo Sistema A-CAES, sendo parte integrante do mesmo. Basicamente, quando houver condições de produção fotovoltaica, o inversor solar acionará o motor elétrico do compressor, que tem um pressostato no vaso de pressão (reservatório de 200L), fazendo com que o mesmo produza ar comprimido a 9bar até a capacidade do reservatório. A partir daí, quando se atinge a pressão necessária, a válvula elétrica libera o fluxo de ar na proporção a atingir 1800RPM no gerador elétrico. Essa regulagem da abertura da válvula é feita através do leitor de rotações diretamente nas funções do CLP.

Os acionamentos, seja do compressor, seja da válvula elétrica, geram um contador de tempo e a contabilização de energias. Essa contabilização de energia produzida pela carga demandada pelo motor elétrico do compressor se dá no inversor solar. Parando-se o motor elétrico, o inversor envia um sinal numérico pelas portas de comunicação com o CLP, computando e armazenando a energia produzida nesse período de funcionamento, sendo armazenado em um slot (cartão SSD) na forma de planilha. A contabilização da energia pneumática (potencial) se dá através da curva de pressão, cujo sinal é gerenciado pelo sensor de pressão IFM™ e pelo tempo de abertura da válvula elétrica. A válvula elétrica abre com 9bar de pressão na linha (medida pelo sensor de pressão) e fecha com 4bar de pressão na linha. As pressões foram estabelecidas conforme o projeto pneumático da turbina pneumática, de tal forma que se tenha a rotação de 1800RPM na mesma, vencendo-se o torque necessário para girar o alternador elétrico. Com a geração elétrica pelo alternador, um conjunto de resistências elétricas dissipa a produção elétrica. Ambas produções são armazenadas através de contabilizações no CLP.

3) Descrição geral do sistema A-CAES:

O projeto de compressão de ar atmosférico foi acoplado ao sistema de regeneração elétrica, procurando-se o máximo rendimento global para Sistema A-CAES em escala laboratorial proposto. Esse A-CAES, trata-se de um sistema composto por um compressor alternativo de ar comprimido com reservatório, alimentado por um sistema elétrico fotovoltaico, que é acoplado ao sistema de regeneração elétrica. O sistema elétrico fotovoltaico é ecologicamente orientado, que recebe energia

proveniente de fontes renováveis e faz a preparação para o armazenamento de energia pneumática e a regeneração proveniente dessa. Esse sistema, conhecido como regeneração ambientalmente orientada (pois não usa meio combustível), faz a geração de energia elétrica. Esse sistema é composto basicamente por:

- a) Um sistema fluxo/tratamento/compressão de ar atmosférico recíproco completo, com sistema de compressão, motor elétrico, pressão operacional 12bar, vazão operacional $0,424\text{m}^3/\text{min}$, potência máxima do motor 3HP, 220V trifásico. Esse sistema é assentado em base específica e acoplado a um sistema de coleta de energia ambientalmente orientada;
- b) Um sistema de regeneração elétrica composto por dispositivo de alívio de pressão através de fluxo de ar em rotores de palhetas, girando à 1800RPM, 7,5CV, 70L/s a 4bar de pressão operacional, acoplado a um sistema de armazenamento de energia pneumática;
- c) Um dispositivo de geração elétrica, acoplado ao item b), girando à 1800RPM, com duas fases, tensão operacional 220V/127V, potência de regeneração aparente de 3,5kVA, com acoplamento direto, assentado em base específica e nivelado com o sistema abaixado de pressão por fluxo direcional;
- d) Sistema de ligações elétricas, composto por cabos adequadamente dimensionados, medidor de geração de energia elétrica e interligações com sistema de comando elétrico, pneumático, energético.

Como mencionado anteriormente, o sistema de compressão de ar foi instalado conjuntamente com o sistema de regeneração na casa de máquinas em bases específicas para cada sistema, construída para assentamento e chumbamento. O sistema de tratamento de ar fica dentro da casa de máquinas, bem como as válvulas elétricas, protegidos pela cobertura. A interligação entre os sistemas foi feita por tubulação executada em tubos de aço conforme DIN2448, com espessura e resistências adequadas para suportar a pressão do sistema. Toda a tubulação e o vaso de pressão foram pintados nas cores adequadas para o fluido “ar comprimido - vaso de pressão”, conforme normas da ABNT. O sistema de fluxo/tratamento/compressão de ar atmosférico foi acoplado a um quadro de comando e força, fornecendo energia advinda de fontes renováveis sob controle, que dá funcionamento

ao mesmo através de inversor de frequência específico dos equipamentos solares, em 220V trifásico. Após esse processo de transformação energética, a energia é armazenada em vaso de pressão pneumático, específico para essa finalidade. Essa energia é liberada para o dispositivo aliviador de pressão por fluxo pneumático que gira a 1800RPM, rotação síncrona ao sistema de geração elétrica.

O sistema de fluxo/tratamento/compressão de ar atmosférico é composto por sistema recíproco para compressão a ar, sistema de refrigeração dos cabeçotes de admissão e descarga, pistões e sistemas mecânicos completos com válvulas. O mesmo é acoplado diretamente a um motor elétrico 220V e de 3HP de potência máxima. O sistema é livre de óleo e fornece 5,5L/s em descarga livre de ar, com 12bar de pressão operacional. O mesmo não necessita de reservatório porque é acoplado a outro sistema com essa finalidade. O mesmo tem filtro de admissão de ar e controle automático de liga/desliga por diferencial de pressão. O reservatório é 200L, com pressão máxima admissível de 12bar.

O sistema de regeneração é composto por sistema aliviador de pressão por fluxo pneumático, que consome 80L/s de ar a 4bar, produzindo 17N.m de torque e 7,5CV de potência no eixo, de tal forma que o mesmo gire a 1800RPM sincronamente para acoplamento a sistema alternador monofásico 220V/127V, com acoplamento direto. Ambos equipamentos são assentados em base metálica construída para nivelamento e alinhamento dos mesmos conjuntos girantes e interligados pneumática e eletricamente com os demais sistemas. O alternador elétrico produz 3,5kVA de potência aparente, girando a 1800RPM síncrona, autorregulado, com sistema de partida.

O acoplamento do sistema de turbina pneumática e gerador elétrico se faz através de um elemento elástico, acoplamento tipo flexível. O nivelamento e alinhamento foi feito com relógio comparador. A turbina pneumática recebe ar proveniente do reservatório do compressor, que está a 12bar de pressão, esse ar passa pelo lubrificador e regulador de pressão e é liberado a 9bar de pressão sobre a válvula elétrica, que tem abertura proporcional. Com a pressão e o fluxo, essa energia potencial atinge as palhetas da turbina pneumática, fazendo-a girar acima do torque inercial do alternador elétrico. A ação da turbina sobre o gerador excita-o, produzindo energia elétrica. O alternador precisa girar a 1800RPM, pois é síncrono. Essa velocidade periférica é regulada pela abertura da válvula com acionamento elétrico. Após a passagem pela turbina, o ar é expelido através de um silenciador. Quando a

pressão, lida pelo sensor de pressão, atinge o mínimo de 4bar, que é a pressão mínima para girar o alternador nas condições ideais, a válvula com acionamento elétrico é fechada pelo CLP.

4) Código Ladder™ para automação do sistema A-CAES:

O código de programação do CLP comanda todo o Sistema A-CAES, interagindo por portas de comunicação com o inversor solar e também pelas saídas e entradas digitais do CLP, a fim de fazer os acionamentos no momento adequado do motor elétrico do compressor, da válvula de acionamento elétrico, e através das saídas analógicas, fazer as regulações necessárias, bem como para obter dados do sensor de pressão, termopar, abertura em tempo real da válvula elétrica. O código Ladder™ usado nos diagramas de blocos da programação dividiu-se basicamente em três módulos: programação principal, comunicação Modbus™ e integração com o inversor solar WEG™ CFW.

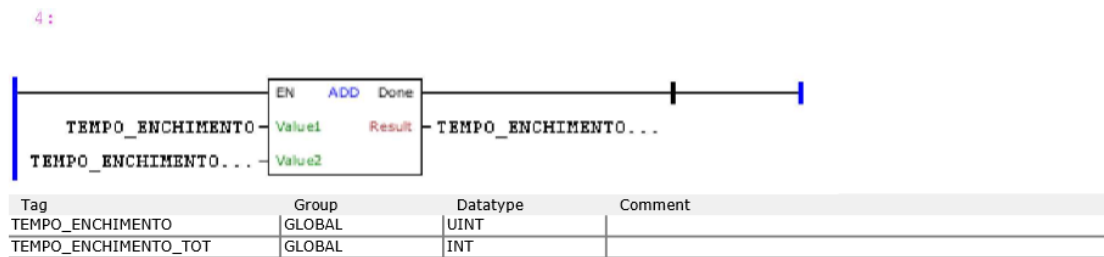
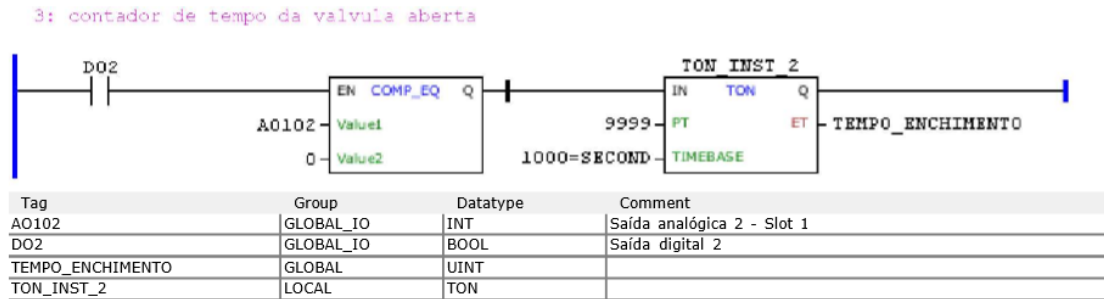
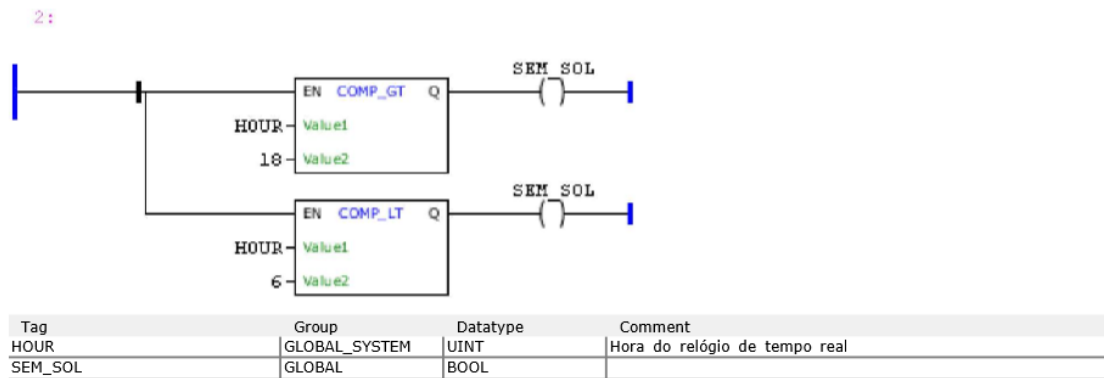
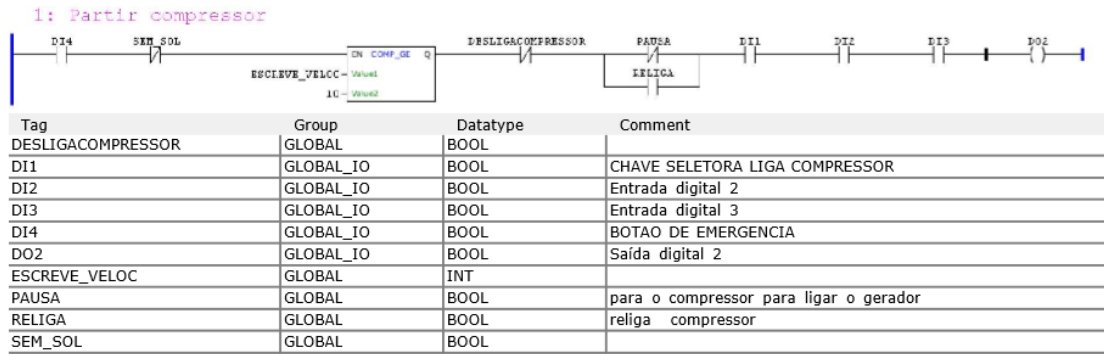
Programação principal:

A programação principal visa a parametrizar as condições de funcionamento do Sistema A-CAES (válvulas, motor do compressor, frequência, horário), bem como determinar as formas de registro dos acionamentos. A programação principal e as parametrizações do CLP através do código Ladder™ são mostradas nas Figuras 33 a 37.

Na Figura 33 o código faz a leitura e registros dos transdutores dos sensores (*hall*, de pressão IFM™ e de temperatura) bem como estabelece a condição mínima de energia fotovoltaica para acionamento do compressor. Na Figura 34, a programação é para fazer a parametrização de abertura da válvula de acionamento elétrico (derivativa proporcional) e integrá-la ao sensor de pressão. Na Figura 35 são registrados os tempos de acionamento do compressor e a temperatura do ar na linha pneumática. Na Figura 36, o código Ladder™ faz o registro simultâneo das grandezas elétricas (tensão e corrente elétrica) provenientes dos painéis fotovoltaicos e do inversor. Essas grandezas são registradas conforme a demanda de carga do motor do compressor. Formam um conjunto de grandezas que registram a energia elétrica real fornecida ao motor do compressor. A Figura 37 apresenta as parametrizações do inversor, como por exemplo a frequência mínima de acionamento, corrente elétrica de curto circuito, tensão de entrada e saída.

Figura 33 - Código Ladder™ principal: registros de sensores

plc_UTFPR - CLP1 - Main Ladder - 31/08/2022 11:26 - 1 / 19



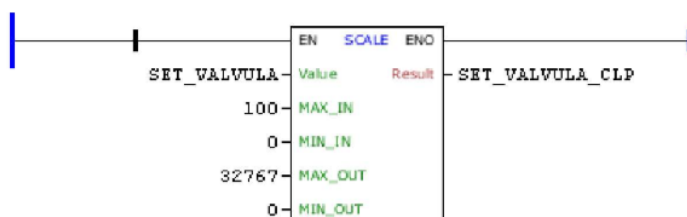
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 34 - Código Ladder™ principal: setup da abertura da válvula e do sensor de pressão

plc_UTFPR - CLP1 - Main Ladder - 31/08/2022 11:26 - 2 / 19

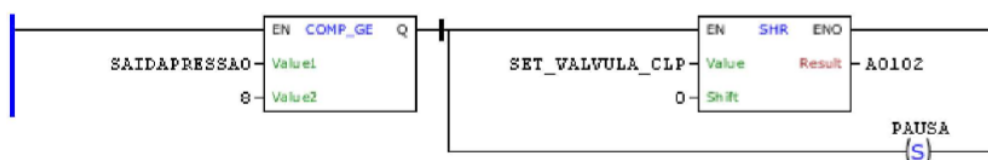
Tag	Group	Datatype	Comment
AI102	GLOBAL_IO	INT	Entrada analógica 2 _ Slot 1
DI4	GLOBAL_IO	BOOL	BOTAO DE EMERGENCIA
SAIDAPRESSAO	GLOBAL	REAL	saída do sensor de pressao

6: escalonamento do valor do setpoint da valvula



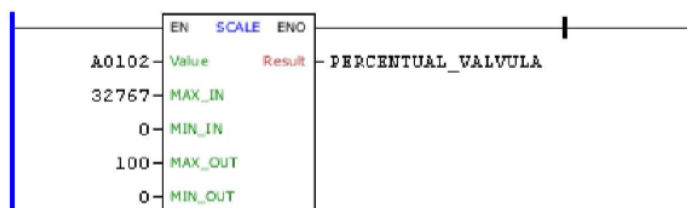
Tag	Group	Datatype	Comment
SET_VALVULA	GLOBAL	INT	
SET_VALVULA_CLP	GLOBAL	INT	

7: pressao do pulmão alta



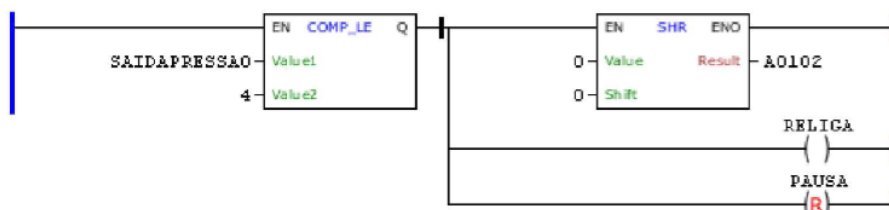
Tag	Group	Datatype	Comment
AO102	GLOBAL_IO	INT	Saída analógica 2 - Slot 1
PAUSA	GLOBAL	BOOL	para o compressor para ligar o gerador
SAIDAPRESSAO	GLOBAL	REAL	saída do sensor de pressao
SET_VALVULA_CLP	GLOBAL	INT	

8: mostra abertura da valvula



Tag	Group	Datatype	Comment
AO102	GLOBAL_IO	INT	Saída analógica 2 - Slot 1
PERCENTUAL_VALVULA	GLOBAL	INT	

9: pressao do pulmão baixa



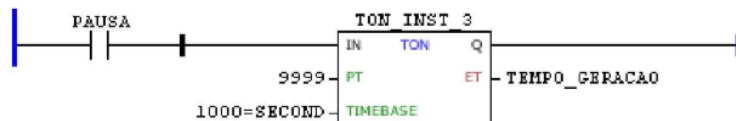
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 35 - Código Ladder™ principal: registros do acionamento do compressor

plc_UTFPR - CLP1 - Main Ladder - 31/08/2022 11:26 - 3 / 19

Tag	Group	Datatype	Comment
AO102	GLOBAL_IO	INT	Saída analógica 2 - Slot 1
PAUSA	GLOBAL	BOOL	para o compressor para ligar o gerador
RELIGA	GLOBAL	BOOL	religa compressor
SAIDAPRESSAO	GLOBAL	REAL	saída do sensor de pressao

10: conta tempo geração



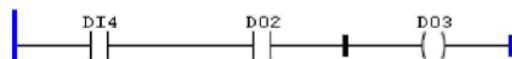
Tag	Group	Datatype	Comment
PAUSA	GLOBAL	BOOL	para o compressor para ligar o gerador
TEMPO_GERACAO	GLOBAL	UINT	
TON_INST_3	LOCAL	TON	

11:



Tag	Group	Datatype	Comment
TEMPO_GERACAO	GLOBAL	UINT	
TEMPO_GERACAO_TOT	GLOBAL	INT	

12: inversor ligado



Tag	Group	Datatype	Comment
DI4	GLOBAL_IO	BOOL	BOTAO DE EMERGENCIA
DO2	GLOBAL_IO	BOOL	Saída digital 2
DO3	GLOBAL_IO	BOOL	Saída digital 3

13: COMPARADOR PARA PROTECAO PARA VALVULA PROPORCIONAL



Tag	Group	Datatype	Comment
DESLIGACOMPRESSOR	GLOBAL	BOOL	
SAIDAPRESSAO	GLOBAL	REAL	saída do sensor de pressao

14: TEMPERATURA BARRILETE



Tag	Group	Datatype	Comment
AI101	GLOBAL_IO	INT	Entrada analógica 1 _ Slot 1
TEMPERATURA	GLOBAL	INT	

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 36 - Código Ladder™ principal: registros das grandezas elétricas da geração fotovoltaica

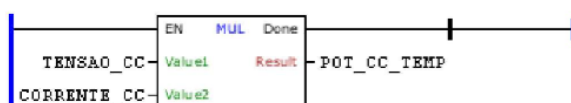
plc_UTFPR - CLP1 - Main Ladder - 31/08/2022 11:26 - 4 / 19

15: POTENCIA DE SAIDA DO INVERSOR DE POTENCIA



Tag	Group	Datatype	Comment
CORRENTE	GLOBAL	INT	
POTENCIA_OUT_INV	GLOBAL	INT	POTENCIA DA SAIDA DO INVERSOR

16: calculo da potencia das placas



Tag	Group	Datatype	Comment
CORRENTE_CC	GLOBAL	INT	CORRENTE DAS PLACA SOLARES
POT_CC_TEMP	GLOBAL	INT	POTENCIA SEM TRATAMENTO
TENSAO_CC	GLOBAL	INT	

17: CORRENTE DE SAIDA DAS PLACAS



Tag	Group	Datatype	Comment
CORRENTE_CC	GLOBAL	INT	CORRENTE DAS PLACA SOLARES
POTENCIA_OUT_INV	GLOBAL	INT	POTENCIA DA SAIDA DO INVERSOR
TENSAO_CC	GLOBAL	INT	

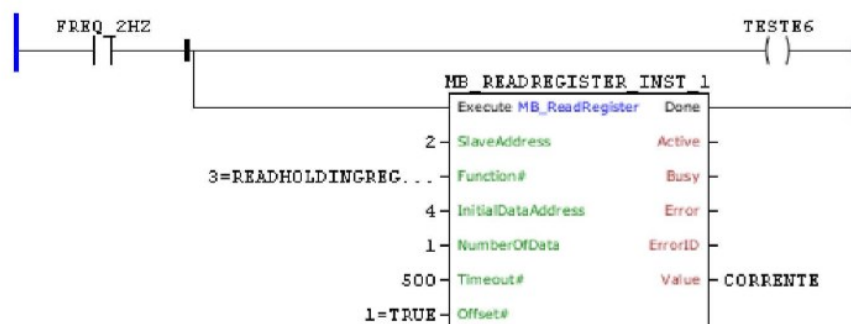
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 37 - Código Ladder™ principal: setup da frequência do inversor

plc_UTFPR - CLP1 - cfw500 - 31/08/2022 11:26 - 6 / 19

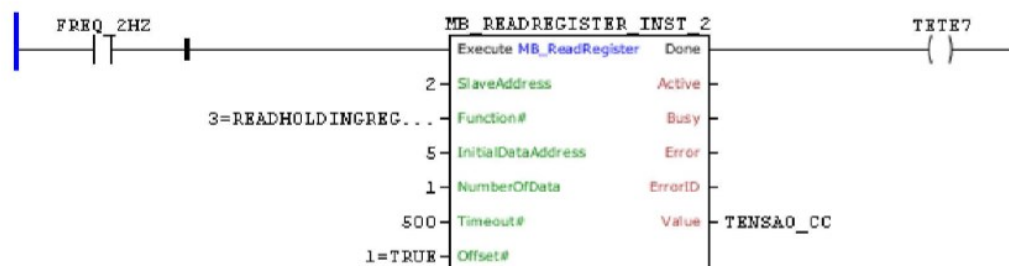
Tag	Group	Datatype	Comment
ESCREVE_VELOC_CLP	GLOBAL	INT	
FREQ_2HZ	GLOBAL_SYSTEM	BOOL	Oscilador 2Hz
MB_WRITEREGISTER_INST_0	LOCAL	MB_WriteRegister	
TESTE5	GLOBAL	BOOL	

5:



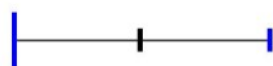
Tag	Group	Datatype	Comment
CORRENTE	GLOBAL	INT	
FREQ_2HZ	GLOBAL_SYSTEM	BOOL	Oscilador 2Hz
MB_READREGISTER_INST_1	GLOBAL	MB_ReadRegister	
TESTE6	GLOBAL	BOOL	

6: leitura tensao barramento CC



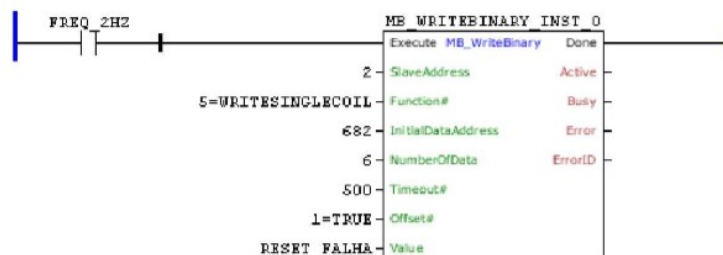
Tag	Group	Datatype	Comment
FREQ_2HZ	GLOBAL_SYSTEM	BOOL	Oscilador 2Hz
MB_READREGISTER_INST_2	GLOBAL	MB_ReadRegister	
TENSAO_CC	GLOBAL	INT	
TETE7	GLOBAL	BOOL	

7: leitura de falha subtensão



Tag	Group	Datatype	Comment
-----	-------	----------	---------

8:



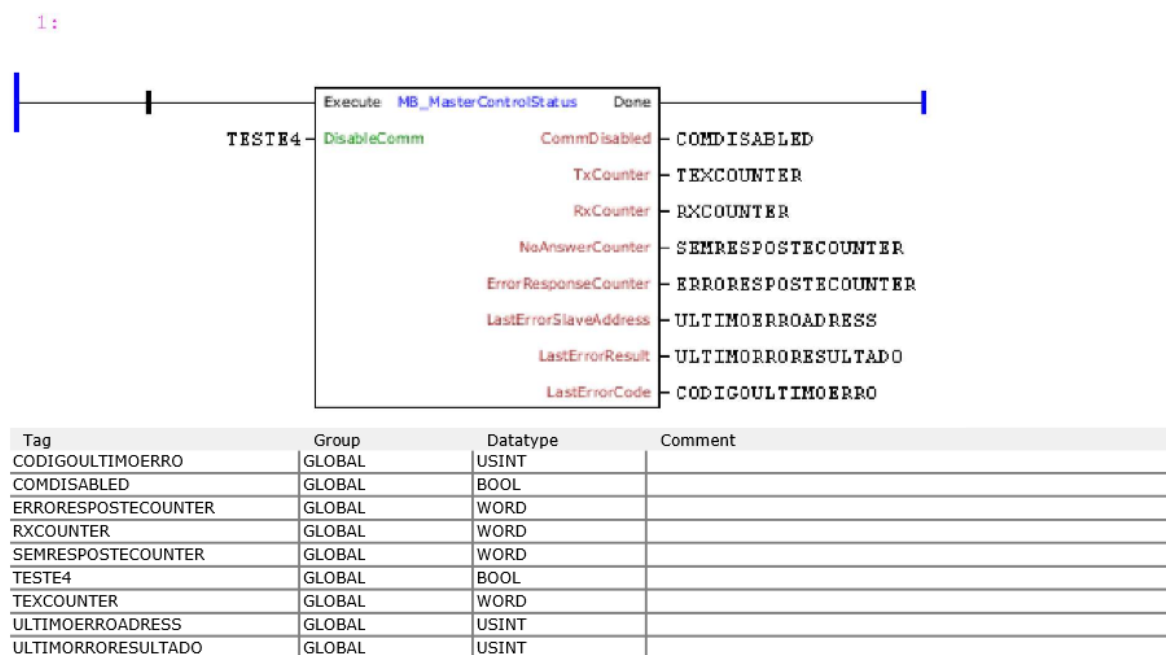
Fonte: Autoria própria (2023)

Comunicação Modbus™:

O segundo módulo da programação do CLP refere-se ao protocolo de comunicação, que nesse caso é a Comunicação Modbus™. Essa é a forma que o CLP envia os dados registrados na programação principal para os meios de saída, ou seja, esse módulo possibilita a exportação ou importação dos dados registrados no CLP para outra mídia (cartão de memória) ou componente eletrônico (inversor). Essa forma de comunicação é mostrada na Figura 38.

Figura 38 - Código Modbus™: exportação dos dados

plc_UTFPR - CLP1 - modbus - 31/08/2022 11:26 - 8 / 19



Fonte: Autoria própria (2023)

Programação do inversor WEG™ CFW:

As Figuras 39 a 46 mostram como foram programadas as telas que aparecem nos menus da IHM (interface homem-máquina) do CLP, bem como ilustram as saídas das parametrizações do inversor de frequência WEG CFW 500. Essas telas são navegáveis diretamente no CLP e é possível fazer algumas parametrizações diretamente na IHM do inversor, como por exemplo, a porcentagem fixa de abertura da válvula de acionamento elétrico ou, a frequência mínima de funcionamento do motor do compressor (respeitando-se as características técnicas do inversor).

Figura 39 - Programação inversor WEG™ CFW 500: Tela 01 - consumo de energia

plc_UTFPR - CLP1 - 6. CONSUMO_PNEUMATICO - 31/08/2022 11:26 - 10 / 19

Visualização da tela



Teclas de função

F1	Função	Nenhum	F2	Função	Nenhum
F3	Função	Nenhum	F4	Função	Nenhum
F5	Função	Nenhum	F6	Função	Nenhum
F7	Função	Nenhum	F8	Função	Nenhum
F9	Função	Nenhum	F10	Função	Nenhum
F11	Função	Nenhum	F12	Função	Nenhum

Componentes da tela

Text		Text	
Coluna	1	Coluna	5
Linha	0	Linha	1
Largura	18	Largura	10
Altura	1	Altura	1
Texto	CONSUMO DA ENERGIA	Texto	PNEUMATICA
Pisca	false	Pisca	false

Text	
Coluna	1
Linha	2
Largura	8
Altura	1
Texto	CONSUMO:
Pisca	false

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 40 - Programação inversor WEG™ CFW 500: setup da frequência do motor do compressor

plc_UTFPR - CLP1 - 2. Compressor - 31/08/2022 11:26 - 12 / 19

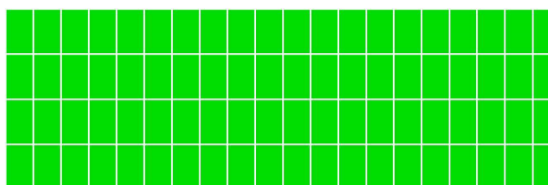
Text		Numeric Input	
Coluna	16	Coluna	13
Linha	3	Linha	3
Largura	2	Largura	2
Altura	1	Altura	1
Texto	Hz	Variável	ESCREVE_VELOC
Pisca	false	Mínimo	0.0
		Máximo	60.0
		Dígitos decimais	0
		Zeros à esquerda	false

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 41 - Programação inversor WEG™ CFW 500: Tela 02 - teclas funcionais diretas

plc_UTFPR - CLP1 - 7. DADOS DE TEMPO - 31/08/2022 11:26 - 13 / 19

Visualização da tela



Teclas de função

F1 Função	Nenhum	F2 Função	Nenhum
F3 Função	Nenhum	F4 Função	Nenhum
F5 Função	Nenhum	F6 Função	Nenhum
F7 Função	Nenhum	F8 Função	Nenhum
F9 Função	Nenhum	F10 Função	Nenhum
F11 Função	Nenhum	F12 Função	Nenhum

Componentes da tela

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 42 - Programação inversor WEG™ CFW 500: tela 03 - dados elétricos da geração solar

plc_UTFPR - CLP1 - 1. DADOS GERAÇÃO FOTOVOLTAICA - 31/08/2022 11:26 - 14 / 19

Visualização da tela



Teclas de função

F1 Função	Nenhum	F2 Função	Nenhum
F3 Função	Nenhum	F4 Função	Nenhum
F5 Função	Nenhum	F6 Função	Nenhum
F7 Função	Nenhum	F8 Função	Nenhum
F9 Função	Nenhum	F10 Função	Nenhum
F11 Função	Nenhum	F12 Função	Nenhum

Componentes da tela

Text		Text	
Coluna	1	Coluna	0
Linha	0	Linha	1
Largura	19	Largura	14
Altura	1	Altura	1
Texto	DADOS GERACAO SOLAR	Texto	Tensao placas:
Pisca	false	Pisca	false
Numeric Input		Text	
Coluna	14	Coluna	17
Linha	1	Linha	1
Largura	3	Largura	3
Altura	1	Altura	1
Variável	TENSAO_CC	Texto	Vcc
Mínimo	0.0	Pisca	false
Máximo	1000.0		
Dígitos decimais	0		
Zeros à esquerda	false		
Text		Text	
Coluna	1	Coluna	17
Linha	2	Linha	2
Largura	13	Largura	1
Altura	1	Altura	1
Texto	Corrente CC:	Texto	A
Pisca	false	Pisca	false
Numeric Output		Text	
Coluna	14	Coluna	2
Linha	2	Linha	3
Largura	3	Largura	9
Altura	1	Altura	1
Variável	CORRENTE_CC	Texto	Potencia:
Dígitos decimais	0	Pisca	false
Atualização	200		
Zeros à esquerda	false		
Pisca	false		

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 43 - Programação inversor WEG™ CFW 500: exportação dos registros de dados elétricos da geração solar

plc_UTFPR - CLP1 - 1. DADOS GERAÇÃO FOTOVOLTAICA - 31/08/2022 11:26 - 15 / 19

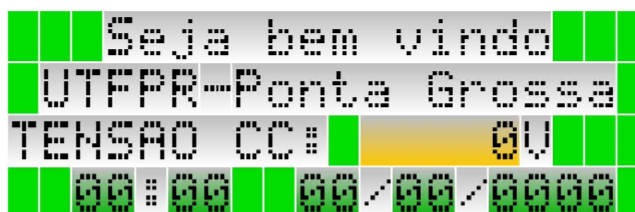
Text		Numeric Output	
Coluna	17	Coluna	12
Linha	3	Linha	3
Largura	1	Largura	5
Altura	1	Altura	1
Texto	W	Variável	POT_CC_TEMP
Pisca	false	Dígitos decimais	0
		Atualização	200
		Zeros à esquerda	false
		Pisca	false

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 44 - Programação inversor WEG™ CFW 500: tela 04 - tela inicial de saudação e mostrador de tensão aplicada de geração solar

plc_UTFPR - CLP1 - 0. Home - 31/08/2022 11:26 - 16 / 19

Visualização da tela



Teclas de função

F1		F2	
Função	Tela	Função	Tela
Tela	3	Tela	2
F3		F4	
Função	Tela	Função	Tela
Tela	4	Tela	6
F5		F6	
Função	Tela	Função	Tela
Tela	5	Tela	1
F7		F8	
Função	Nenhum	Função	Nenhum
F9		F10	
Função	Nenhum	Função	Nenhum
F11		F12	
Função	Nenhum	Função	Nenhum

Componentes da tela

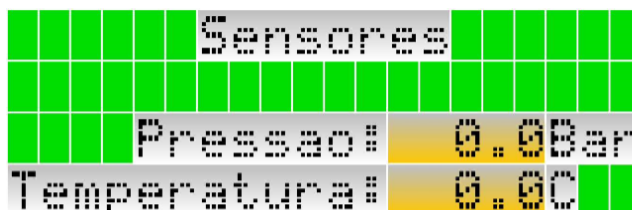
Text		Text	
Coluna	3	Coluna	1
Linha	0	Linha	1
Largura	14	Largura	5
Altura	1	Altura	1
Texto	Seja bem vindo	Texto	UTFPR
Pisca	false	Pisca	false
Text		Text	
Coluna	7	Coluna	6
Linha	1	Linha	1
Largura	12	Largura	1
Altura	1	Altura	1
Texto	Ponta Grossa	Texto	-
Pisca	false	Pisca	false
Text		Numeric Output	
Coluna	0	Coluna	11
Linha	2	Linha	2
Largura	10	Largura	5
Altura	1	Altura	1
Texto	TENSAO CC:	Variável	TENSAO_CC
Pisca	false	Dígitos decimais	0
		Atualização	200
		Zeros à esquerda	false
		Pisca	false
Text		Text	
Coluna	16	Coluna	4
Linha	2	Linha	3
Largura	1	Largura	1
Altura	1	Altura	1
Texto	V	Texto	:
Pisca	false	Pisca	false

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 45 - Programação inversor WEG™ CFW 500: tela 05 - Mostrador de pressão operacional e temperatura

plc_UTFPR - CLP1 - 3. Sensores - 31/08/2022 11:26 - 18 / 19

Visualização da tela



Teclas de função

F1	Função	Nenhum	F2	Função	Nenhum
F3	Função	Nenhum	F4	Função	Nenhum
F5	Função	Nenhum	F6	Função	Nenhum
F7	Função	Nenhum	F8	Função	Nenhum
F9	Função	Nenhum	F10	Função	Nenhum
F11	Função	Nenhum	F12	Função	Nenhum

Componentes da tela

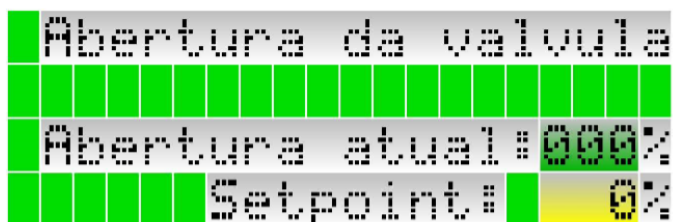
Text	Coluna	6	Text	Coluna	17
	Linha	0		Linha	2
	Largura	8		Largura	3
	Altura	1		Altura	1
	Texto	Sensores		Texto	Bar
	Pisca	false		Pisca	false
Text	Coluna	4	Numeric Output	Coluna	12
	Linha	2		Linha	2
	Largura	8		Largura	5
	Altura	1		Altura	1
	Texto	Pressao:		Variável	SAIDAPRESSAO
	Pisca	false		Dígitos decimais	1
				Atualização	200
				Zeros à esquerda	false
				Pisca	false
Text	Coluna	17	Text	Coluna	0
	Linha	3		Linha	3
	Largura	1		Largura	12
	Altura	1		Altura	1
	Texto	C		Texto	Temperatura:
	Pisca	false		Pisca	false
Numeric Output	Coluna	12			
	Linha	3			
	Largura	5			
	Altura	1			
	Variável	TEMPERATURA			
	Dígitos decimais	1			
	Atualização	200			
	Zeros à esquerda	false			
	Pisca	false			

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 46 - Programação inversor WEG™ CFW 500: tela 06 - Mostrador de setup manual da abertura da válvula

plc_UTFPR - CLP1 - 4. Valvula - 31/08/2022 11:26 - 19 / 19

Visualização da tela



Teclas de função

F1	Função	Nenhum	F2	Função	Nenhum
F3	Função	Nenhum	F4	Função	Nenhum
F5	Função	Nenhum	F6	Função	Nenhum
F7	Função	Nenhum	F8	Função	Nenhum
F9	Função	Nenhum	F10	Função	Nenhum
F11	Função	Nenhum	F12	Função	Nenhum

Componentes da tela

Text	Coluna	1	Text	Coluna	19
	Linha	0		Linha	2
	Largura	19		Largura	1
	Altura	1		Altura	1
	Texto	Abertura da valvula		Texto	%
	Pisca	false		Pisca	false
Text	Coluna	1	Message	Coluna	16
	Linha	2		Linha	2
	Largura	15		Largura	3
	Altura	1		Altura	1
	Texto	Abertura atual:		Variável	PERCENTUAL_VALVULA
	Pisca	false		Atualização	200
Text	Coluna	19	Textos	B0	000
	Linha	3			
	Largura	1	Text	Coluna	6
	Altura	1		Linha	3
	Texto	%		Largura	9
	Pisca	false		Altura	1
Numeric Input	Coluna	16		Texto	Setpoint:
	Linha	3		Pisca	false
	Largura	3			
	Altura	1			
	Variável	SET_VALVULA			
	Mínimo	0.0			
	Máximo	100.0			
	Dígitos decimais	0			
	Zeros à esquerda	false			

Fonte: Autoria própria (2023)

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PRELIMINARES E DISCUSSÕES

Os resultados experimentais preliminares foram obtidos no mês de outubro de 2020, durante dias com incidência solar acentuada. As condições ambientais eram de pouco vento, pela manhã, entre 10h e 12h. A coleta de informações se deu de forma automática, conforme previsto pelo projeto e foi disponibilizada em planilhas, sendo adensados os resultados nas Tabelas 20 a 22. A abertura da válvula de acionamento elétrico se deu em 65% do curso permitido. Ressalta-se que a rotação síncrona foi estabelecida sem problemas, apenas fazendo-se o setup no CLP.

Na Tabela 17 são apresentados os resultados experimentais preliminares para a produção energética do Sistema A-CAES em questão. Para se calcular a eficiência média total, fez-se a média das razões entre as energias geradas (kWh) e as energias provenientes dos painéis fotovoltaicos (kWh).

Tabela 17 - Resultados experimentais do sistema A-CAES

Tempo [min]	Potência média inversor [kW]	Energia painéis solares [kWh]	Corrente [A]	Potência Compressor [kW]	Energia Compressor [kWh]	Tempo Geração [s]	Energia Gerada [kWh]	Energia de ar comp. [kWh]
00:02:22	3,0099	0,12	8,40	2,98	0,12	27	0,0263	0,0383
00:01:49	2,8956	0,09	7,80	2,76	0,08	28	0,0272	0,0309
00:01:28	3,0480	0,07	8,10	2,87	0,07	27	0,0263	0,0374
00:03:47	2,9718	0,19	7,50	2,66	0,17	34	0,0331	0,0292
00:03:40	2,9337	0,18	7,00	2,48	0,15	28	0,0272	0,0337
00:03:42	2,9337	0,18	6,40	2,27	0,14	29	0,0282	0,0412
00:03:03	2,9528	0,15	5,60	1,98	0,10	31	0,0301	0,0286
Eficiência Média Total							18%	

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 18 relaciona o tempo de despressurização real do reservatório de ar comprimido e a energia potencial obtida com a pressurização através do compressor.

Tabela 18 - Dados experimentais de alívio de pressão

(continua)

Frequência	Faixa de pressão	Enchimento [s]	[L]	[Nm ³]	Pressão [bar]	Energia de ar comprimido [kWh]
60 Hz	4,0 a 9,0 bar	223	200	0,714	8,090152	0,0383
60 Hz	4,0 a 8,0 bar	180	200	0,576	8,084292	0,0309
60 Hz	4,0 a 9,0 bar	218	200	0,698	8,084292	0,0374

Tabela 18 - Dados experimentais de alívio de pressão

						(conclusão)
Frequência	Faixa de pressão	Enchimento [s]	[L]	[Nm ³]	Pressão [bar]	Energia de ar comprimido [kWh]
60 Hz	4,0 a 8,0 bar	170	200	0,544	8,084292	0,0292
60 Hz	4,0 a 8,0 bar	196	200	0,627	8,084292	0,0337
60 Hz	4,0 a 9,0 bar	240	200	0,768	8,072573	0,0412
60 Hz	1,0 a 9,0 bar	483	200	1,546	8,084292	0,0830

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 18 relaciona as eficiências energéticas em cada etapa de trabalho do Sistema A-CAES. A energia listada no Item #1 - painel, é obtida através do cálculo automático do produto da tensão pela corrente operacional no período de funcionamento do Sistema A-CAES (compressor trabalhando). A energia calculada para o Item #2 - motor elétrico, é obtida pelo produto da corrente elétrica operacional do motor elétrico do compressor pela tensão aplicada e tempo de funcionamento. A energia calculada para o Item #3 - Compressor, é obtida pelo tempo de funcionamento do compressor juntamente com os valores de vazão mássica e pressão parametrizada. Enquanto que a energia calculada para o Item #4 - Gerador, é resultado conjunto do sistema de regeneração, sendo calculada pela corrente elétrica gerada na carga de resistências elétricas e pela tensão síncrona do alternador. A eficiência média total é a mesma da Tabela 19, calculando-se a razão entre a energia proveniente do gerador elétrico pela energia proveniente do painel.

Tabela 19 - Eficiência energética experimental por fase do Sistema A-CAES

Item	Descrição	Energia [Kwh]	Eficiência
#1	Painel	0,1501	-
#2	Motor Elétrico	0,1174	78%
#3	Compressor	0,0374	32%
#4	Gerador	0,0272	73%
Média Total			18%

Fonte: Autoria própria (2023)

Como previsto, alcançaram-se resultados experimentais ligeiramente menores para eficiência global do sistema, que ficou em 18% em relação aos 20% previstos nas Tabelas 6 e 12. A principal discussão sobre esses resultados obtidos está no fato de que a eficiência de compressão é de apenas 46%. Isso se deve

principalmente na escolha comercial de um compressor alternativo mais simples e pelo tamanho do reservatório acoplado ao compressor de apenas 200 litros.

Ressalta-se que os equipamentos usados na Alemanha e nos EUA são de portes e construções diferentes, tipo turbo gerador, onde é obtida uma eficiência maior e pressões cerca de 7 vezes maiores que a utilizada nessa bancada experimental. Além disso, o sistema de controle cinético e térmico dos sistemas de grande porte também tem um projeto mais elaborado e são integrados com ciclos térmicos com uso de combustível fóssil. Em comparação com os volumes armazenados de 310.000m^3 às pressões da ordem de 72bar nesses grandes sistemas.

As irreversibilidades presentes são mais importantes em sistemas de pequeno porte experimental, como o aqui estudado. Mesmo assim, o sistema se mostrou controlável com um sistema simples de CLP e poucos sensores, porém necessitando de tratamento de sinais.

5 CONCLUSÕES

O sistema em escala laboratorial A-CAES (Estocagem de Energia por Compressão de Ar Adiabática, do inglês, *Adiabatic Compressor Air Energy Storage*) implantado no Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética (LabMPEE) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Ponta Grossa, foi projetado em termos de um conjunto de variáveis termodinâmicas e também em variáveis técnicas como por exemplo o volume de reservação ideal, o rendimento global para cada pressão operacional de ar comprimido no reservatório, a proximidade com a realidade experimental das considerações em termos de transformações isoentrópicas de compressão e expansão nos equipamentos e volumes de controle considerados no projeto. Os resultados experimentais preliminares apresentaram uma eficiência global do sistema de 18%, ligeiramente menor em relação aos 20% previstos teoricamente nas Tabelas 6 e 12.

Também, observa-se através dos resultados experimentais, a necessidade de controle dos sistemas com componentes de automação, leituras automáticas, controles de fluxo mássico automáticos, uso do PID nos sistemas eletrônicos. Verifica-se que esses controles são facilitados com reservatórios de maior volume de reservação. E que a pressão operacional do ar comprimido no reservatório tem influência direta no rendimento global. A pressão de entrada do ar comprimido na turbina está regulada para 9,8 bar.

Outros fatores de dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, com a simulação por programas comercialmente disponíveis, porém atribuindo-se à simulação a previsão da potência ativa elétrica operacional, baseada na corrente elétrica, tensão e fator de potência do motor do compressor, poderá culminar com o dimensionamento menor do sistema de geração fotovoltaica. Neste caso, a corrente elétrica operacional do compressor teve a média de 8,2A, na tensão monofásica de 220V, ou seja, potência operacional de 2,2kVA. Com esses dados inseridos no *software* de simulação, provavelmente chegar-se-ia à potência de 3,0kW-p do sistema de geração fotovoltaica, para a cidade de Ponta Grossa/PR. De qualquer forma, esse dado não teria influência significativa em um sistema industrial, pois a energia que é disponibilizada pelo operador do sistema elétrico é a excedente da rede elétrica.

Destaca-se que essa Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica pode servir de base para projetos e implantações industriais de Sistemas A-CAES devida à previsibilidade dos seus resultados teóricos com os resultados alcançados experimentalmente, e também em comparação com dados operacionais de sistemas industriais consolidados mundialmente. Essa dissertação cumpriu com seus objetivos principal e específicos, cuja análise de um sistema adiabático de armazenamento de energia por ar comprimido se deu através de equações fundamentais, projetou-se e instalou-se um Sistema A-CAES em escala laboratorial e seus sistemas de controle e realizou-se os testes preliminares, obtendo resultados previstos.

No que tange ao projeto, essa dissertação de mestrado relata às inúmeras possibilidades de formação de conjunto A-CAES, com configurações diversas de sistemas, equipamentos e componentes que foram estudados, resultando na seleção de um microssistema exequível e bem próximo à realidade. Destaca-se que foram realizados experimentos pioneiros na América Latina, inclusive com melhoria dos estudos, incluindo-se no microssistema estudado, os sistemas de geração fotovoltaica, quadro de comando, controle e automação, sensores eletrônicos, coleta automática de dados, sistema de regeneração elétrica acopladas à turbina pneumática, além dos componentes normais de um sistema A-CAES (compressor, reservatório e turbina). Essa pesquisa experimental consolida as aplicações do Sistema A-CAES para armazenamento de energia ecologicamente orientada.

Portanto, com os resultados experimentais preliminares obtidos, há a validação prática do Sistema A-CAES proposto nessa Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, usando-se de energia renovável, sem uso de combustíveis fósseis, sem geração de resíduos sólidos, cumprindo com seus objetivos principais de estabilização da geração da energia elétrica e de armazenamento ecologicamente orientado de energia na forma de ar comprimido. Com realização de melhorias, que não foram previstas inicialmente por se tratar de experimentação pioneira na América Latina, possivelmente atingir-se-ão valores semelhantes às plantas industriais. Ressalta-se que esse Sistema A-CAES implantando teve êxito ao fazer o uso da energia nos momentos adequados, através dos controles dos sistemas via CLP e inversor de frequência. Ajustes poderão ser feitos e adequações para sistemas de grande porte poderão ser estendidas trazendo vantagens para o armazenamento de energia limpa, sem inundação de áreas ou biomas.

5.1 Sugestões de melhorias para trabalhos futuros

Os projetos CAES e A-CAES são multidisciplinares e complexos. Há inúmeros estudos direcionados sob a forma de artigos para divulgação bibliográfica desse experimento técnico-científico-industrial. As operações comerciais tem sido incentivadas e vem sendo estudadas por inúmeros cientistas e engenheiros térmicos. Como forma de melhoramento da presente Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, têm-se as seguintes sugestões:

- Utilização de *softwares* modeladores para efetuar um melhor controle dos sistemas;
- Reprodução de sistemas maiores, com turbinas e compressores a gás e reservatório subterrâneos com maiores pressões;
- Extensão e estudo dos resultados para aplicação em uma planta industrial inédita na América Latina.

REFERÊNCIAS

BAILIE, R. **Compress air energy storage**. Texas (USA): Siemens Energy, 2021.

BAMBOZZI geradores. Disponível em: <https://bambozzi.com.br/geradores>. Acesso em: 12 ago. 2023.

BUDT, M. **Compressed air energy storage (CAES): state-of-the-art and further development**. Fraunhofer Gesellschaft, Bremen (Deutschland), 2013.

CARRIER Handbook. **Manual de aire acondicionado**. Barcelona: Boixareu, 1991.

CASTELLÕES, F. V. **Petrobrás e P&D em Armazenamento de Energia**. Apresentação Eletrônica, 2016.

COPEL (Companhia Paranaense de Energia). **Simulador de consumo**. Disponível em: <https://www.copel.com/site/copel-distribuicao/simule-seu-consumo>. Acesso em: 12 abr. 2022.

DIMBARRE, V. V. **Investigação experimental do comportamento térmico de termossifões aplicados a coletores solares utilizando nanofluido de óxido de grafeno**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2021.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Atlas consolidado da eficiência energética**. Brasília: EPE, 2020.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanco energético nacional BEM**. Brasília: EPE, 2023.

KAZI motores pneumáticos. Disponível em: <https://www.kazimotors.com.br>. Acesso em: 12 ago. 2023.

KROOS, K. A.; POTTER, M. C. **Termodinâmica para engenheiros**. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

LI, P. Y. **Isothermal Compressed Air Energy Storage (I-CAES) System**. University of Minesota (USA): Elsevier, 2021.

MOREIRA, J. R. S. **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

NEOSOLAR. **Calculadora solar**. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br>. Acesso em: 12 mar. 2020.

PVSYSTEM. Software para dimensionamento de instalações fotovoltaicas. Pvsyst : Logiciel Photovoltaïque, 2023.

SECIUK, C. Governo estima investimentos de R\$ 3,2 tri até 2031 para atender demanda de energia. **Gazeta do Povo**, 6 abr. 2022.

SIEMENS Energy Global™. **Compressed air Energy Storage (CAES):** a proven solution for cost-effective, grid-scale and long-duration power storage. Industrial Applications. Deutschland, 2020.

TONG, Z.; *et al.* **A review on the development of compressed air energy storage in China:** technical and economic challenges to commercialization. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou. China, 2021.

UPSOLAR. Disponível em: <http://www.upsolar.com>. Acesso em: 12 ago. 2023.

XING, L.; *et al.* **Modelling study, efficiency analysis and optimisation of large-scale Adiabatic Compressed air Energy Storage systems.** School of Engineering, University of Warwick, 2015.

YINGLI Energy Solar. Disponível em: <https://www.yinglisolar.com/en>. Acesso em: 12 ago. 2023.