

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL DOUTORADO**

DANIEL VIEIRA PINTO

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA MICRO
CHP EXPERIMENTAL PARA VEÍCULOS RECREATIVOS**

São Leopoldo

2024

DANIEL VIEIRA PINTO

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA MICRO
CHP EXPERIMENTAL PARA VEÍCULOS RECREATIVOS

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

Coorientador: Prof. Dr. Josimar Souza Rosa

São Leopoldo

2024

P659a

Pinto, Daniel Vieira.

Avaliação de um sistema micro CHP experimental para veículos recreativos / por Daniel Vieira Pinto. – 2024.

152 f. : il. ; 30 cm.

Tese (doutorado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São Leopoldo, RS, 2024.

Orientador: Dr. Paulo Roberto Wander.

Coorientador: Dr. Josimar Souza Rosa.

1. Veículos recreativos. 2. Sistema micro CHP.
3. Cogeração. 4. Revisão sistemática de literatura.
5. Recuperação térmica. 6. Energia elétrica. I. Título.

CDU: 629.3:621.311

Catálogo na Publicação (CIP):
Bibliotecário Alessandro Dietrich - CRB 10/2338

RESUMO

Veículos recreativos RV (do inglês - *recreational vehicle*) são casas sobre rodas que podem ser tracionadas por um veículo automotor, no caso dos trailers, ou ainda, podem ser autopropelidos, como um motorhome. Para utilização confortável de um RV, há necessidade de fornecimento de energia elétrica para recarga das suas baterias e operação dos eletrodomésticos e equipamentos instalados, bem como de energia térmica, para aquecimento de água e eventualmente climatização. Uma solução convencional e bastante utilizada para abastecimento de energia elétrica é a instalação de módulos fotovoltaicos consorciados com conexão à uma rede elétrica, quando possível, embora em alguns casos sejam utilizados moto-geradores a combustão. Já o aquecimento de água é feito, geralmente, por meio de aquecedores de passagem a gás ou de acumulação híbridos gás/elétrico. Em geral, a climatização dos RVs é feita por meio de ar-condicionado do tipo *split* e calefação a gás ou diesel. No intuito de desenvolver uma alternativa aos métodos de provimento de energia atualmente disponíveis, aliado a busca por meios mais eficientes e ecológicos de utilização da energia, este trabalho propõe a criação de um sistema de cogeração (calor e energia elétrica) para RVs. Foi realizada uma revisão sistemática de literatura (RSL), abrangendo artigos científicos sobre sistemas combinados de calor e energia (CHP, do inglês, *combined heat and power*). A RSL foi precedida por uma busca por documentos sobre cogeração e aproveitamento de energia em RVs, tanto em bases científicas quanto em bancos de propriedade intelectual. Identificou-se uma lacuna de pesquisa sobre dispositivos micro CHP para RVs. No desenvolvimento deste trabalho foi criado um dispositivo micro CHP experimental (mCHP-Ex), com 980 W de potência elétrica máxima, composto por um motor de combustão interna monocilíndrico, um alternador automotivo e trocadores de calor para recuperação térmica. O protótipo foi enclausurado e instrumentado, possibilitando as medições da potência térmica disponível no fluxo de água (proveniente da recuperação de calor dos gases de exaustão, do óleo lubrificante e do ar de arrefecimento) além da medição da potência elétrica do alternador. Para quantificar a disponibilidade de potências elétrica e térmica, bem como os parâmetros de eficiência e operação do sistema, foram realizados ensaios em 46 diferentes condições de operação, combinando variações entre 2000 rpm e 3600 rpm na frequência de rotação do motor e dos níveis de carga elétrica imposta ao alternador, desde ausência de carga até 100% de carga. A eficiência elétrica do mCHP-Ex atingiu $10,18\% \pm 0,2\%$ a 3008 rpm com 83% de carga. A potência elétrica máxima foi de $0,746 \text{ kW} \pm 0,015 \text{ kW}$ a 3637 rpm e 100% de carga. A máxima taxa de recuperação de energia térmica foi de $3,267 \text{ kW} \pm 0,039 \text{ kW}$. O fator de utilização chegou a $65,57\% \pm 0,22\%$. Se comparado aos sistemas micro CHP comerciais vistos na RSL, o mCHP-Ex pode ser até 48% mais leve. Comparado aos meios tradicionais de provimento de potência elétrica e potência térmica, em separado, para RVs, o mCHP-Ex apresenta aproveitamento 63% maior da energia primária quando a demanda é de potência elétrica e aquecimento do ambiente. Entretanto para as condições em que a demanda é por potência elétrica e aquecimento de água, ou ainda somente potência elétrica, as atuais soluções disponíveis ainda são mais eficientes.

Palavras-chaves: Veículos Recreativos. Sistema Micro CHP. Cogeração. Revisão sistemática de Literatura. Recuperação térmica.

ABSTRACT

Recreational vehicles (RVs) are homes on wheels that can be pulled by a motor vehicle, in the case of trailers, or can be self-propelled, like a motorhome. For comfortable use of an RV, there is a need for an electrical supply to recharge its batteries and operate the appliances and equipment installed, as well as thermal energy, for heating water and possibly air conditioning. A conventional and widely used solution for supplying electrical energy is the installation of photovoltaic modules combined with a connection to an electrical grid, when possible, although in some cases combustion engine generators are used. Water heating is generally done by means of gas-fired instantaneous heaters or hybrid gas/electric storage heaters. In general, air conditioning in RVs is done by means of split-type air conditioning and gas or diesel heating. In order to develop an alternative to the currently available energy supply methods, combined with the search for more efficient and environmentally friendly means of energy use, this work proposes the creation of a cogeneration system (heat and electric power) for RVs. A systematic literature review (SLR) was carried out, covering scientific articles on combined heat and power (CHP) systems. The SLR was preceded by a search for documents on cogeneration and energy use in RVs, both in scientific databases and in intellectual property banks. A research gap was identified on micro CHP devices for RVs. In the development of this work, an experimental micro CHP device (mCHP-Ex) was created, with 980 W of maximum electrical power, consisting of a single-cylinder internal combustion engine, an automotive alternator and heat exchangers for thermal recovery. The prototype was enclosed and instrumented, enabling measurements of the thermal power available in the water flow (from exhaust gases, lubricating oil and cooling air heat recovery systems) in addition to the electrical power of the alternator. To quantify the availability of electrical and thermal power, as well as the efficiency and operation parameters of the system, tests were performed in 46 different operating conditions, combining variations between 2000 rpm and 3600 rpm in the engine rotation frequency and the levels of electrical load imposed on the alternator, from no load to 100% load. The electrical efficiency of the mCHP-Ex reached $10.18\% \pm 0.2\%$ at 3008 rpm with 83% load. Maximum electrical output was $0.746 \text{ kW} \pm 0.015 \text{ kW}$ at 3637 rpm and 100% load. Maximum thermal energy recovery rate was $3.267 \text{ kW} \pm 0.039 \text{ kW}$. Utilization factor reached $65.57\% \pm 0.22\%$. Compared to commercial micro CHP systems seen at RSL, mCHP-Ex can be up to 48% lighter. Compared to traditional means of providing separate electrical and thermal power for RVs, mCHP-Ex provides 63% greater primary energy utilization when the demand is for electrical power and space heating. However, for conditions where the demand is for electrical power and water heating, or even electrical power alone, current solutions available are still more efficient.

Keywords: Recreational Vehicles. Micro CHP System. Cogeneration. Systematic Literature Review. Thermal Recovery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Equipamentos de energia em um RV	19
Figura 2 – Nomenclatura de um motor alternativo	25
Figura 3 – Eficiência do ciclo Otto ideal para diferentes valores de r e k	27
Figura 4 – Componentes de um alternador automotivo	28
Figura 5 – Banco com duas baterias estacionárias instalado em um trailer	31
Figura 6 – Inversor multifunção Technomaster TM 41 2500	32
Figura 7 – Trailer Apolo com ar condicionado <i>split</i>	34
Figura 8 - Aquecedor Propex HS2000	35
Figura 9 – Aquecedor a diesel Webasto Air Top 2000 STC	36
Figura 10 – Fluxograma de desenvolvimento da RSL	38
Figura 11 – Fluxograma de elegibilidade dos documentos	41
Figura 12 – Seleção dos documentos elegíveis para a análise completa.....	42
Figura 13 – Ocorrência das palavras-chave.....	43
Figura 14 – Pesquisas sobre o tema dos artigos do <i>corpus</i> de análise.....	44
Figura 15 – Redes de colaboração entre os autores.....	45
Figura 16 – Principais instituições de pesquisa	46
Figura 17 – Publicações dos artigos do <i>corpus</i> de análise por países	46
Figura 18 – Principais revistas científicas	46
Figura 19 – Parcelas de recuperação térmica do <i>Marathon Engine Systems ecopower</i>	54
Figura 20 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho	63
Figura 21 – Motor Branco B4T-3.0.....	64
Figura 22 – Alternador Valeo 14 V/70A	64
Figura 23 – Invólucro de alumínio para enclausuramento do motor.....	66
Figura 24 – Ilustração dos fluxos para recuperação térmica	66
Figura 25 – Detalhes da montagem do mCHP-Ex	67
Figura 26 – Bomba de óleo.....	67
Figura 27 – Trocador de calor HE-1.....	68
Figura 28 – Trocador de calor HE-2.....	68
Figura 29 – Trocador de calor HE-3.....	68
Figura 30 – Esguicho de óleo no pistão.....	69
Figura 31 – Montagem final do protótipo	70
Figura 32 – Principais pontos de medição no mCHP-Ex	73

Figura 33 – Instrumentação do mCHP-Ex	74
Figura 34 – Composição das grandezas de interesse nas medições	75
Figura 35 – Temperaturas dos gases de exaustão.....	84
Figura 36 – Temperaturas do ar de arrefecimento.....	86
Figura 37 – Temperaturas da água	87
Figura 38 – Vazões mássicas do ar de admissão e ar de arrefecimento	88
Figura 39 – Tensão e corrente no alternador	89
Figura 40 – Eficiência volumétrica e fator λ	90
Figura 41 – Fator λ e a vazão mássica do ar de admissão.....	91
Figura 42 – Regiões de λ em função de N e Pe_l	92
Figura 43 – Potências de entrada e saída do mCHP-Ex	93
Figura 44 – Potência elétrica	93
Figura 45 – Potência de recuperação térmica total.....	94
Figura 46 – Curvas de potência entre 2800 rpm e 3600 rpm	94
Figura 47 – Contribuição das parcelas de recuperação térmica de cada trocador de calor	96
Figura 48 – Diagrama de Sankey do mCHP-Ex em potência máxima	97
Figura 48 – Eficiência elétrica em função da potência elétrica.....	98
Figura 49 – Eficiência de recuperação térmica em função da potência elétrica.....	99
Figura 50 – Fator de utilização em função do fator Lambda	100
Figura 51 – Mapa de desempenho do mCHP-Ex (η_{el})	100
Figura 52 – Mapa de desempenho do mCHP-Ex (FU)	101
Figura 53 – Mapa de desempenho do mCHP-Ex (linhas de máxima η_{el} e máximo FU).....	102
Figura 54 – Potências e eficiências do mCHP-Ex.....	102
Figura 55 – Consumo específico elétrico	105
Figura 56 – Consumo específico total	106
Figura 57 – Esquema elétrico de monitoramento e comando	118
Figura 58 – Placas eletrônicas de interconexão da instrumentação.....	119
Figura 59 – Placas eletrônicas da célula de carga	119
Figura 60 – Calibração MAF-2	121
Figura 61 – Curva de calibração do MAF-2.....	122
Figura 62 – Curvas características do MAF em diferentes diâmetros de carcaça.....	123
Figura 63 – Curvas características do MAF em diferentes diâmetros de carcaça.....	124
Figura 64 – Curvas características do MAF para carcaça com diâmetro de 35 mm	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Definição do PICOC.....	39
Quadro 2 – Resultados da busca nas bases de dados.....	42
Quadro 3 – Resumo dos dados dos artigos da RSL.....	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alguns exemplos de moto-geradores <i>inverter</i> disponíveis no mercado brasileiro.	18
Tabela 2 – Alguns exemplos de moto-geradores de corrente contínua.....	19
Tabela 3 – Comparativo de moto-geradores portáteis.....	30
Tabela 4 – Dados comparativos de aquecedores a diesel.....	36
Tabela 5 – Produtividade dos autores.....	44
Tabela 6 – Influência dos autores.....	45
Tabela 7 – Artigos mais influentes.....	47
Tabela 8 – Principais dados dos equipamentos avaliados por Possidente, <i>et al.</i> (2006).....	48
Tabela 9 – Sistemas micro CHP até 10 kWe, com MCI listados por Sibilio, <i>et al.</i> (2007).....	49
Tabela 10 – Dados dos equipamentos avaliados por Rosato, Sibilio e Ciampi (2013).....	50
Tabela 11 – Equipamentos micro CHP citados por Bianchi, De Pascale e Melino (2013).....	51
Tabela 12 – Resultados obtidos por Rey, <i>et al.</i> (2016).....	52
Tabela 13 – Equipamentos vistos em Ippolito e Venturini (2017), (2017B), (2018) e (2019)	53
Tabela 14 – Comparativo de desempenho de Smith e Few (2001).....	56
Tabela 15 – Dados comparativos entre diferentes tecnologias micro CHP.....	56
Tabela 16 – Sistemas micro CHP, com MCI avaliados por Roseli, <i>et al.</i> (2011).....	58
Tabela 17 – Equipamentos micro CHP citados por Angrisani, <i>et al.</i> (2012).....	58
Tabela 18 – Dados técnicos do motor Branco B4T-3.0.....	64
Tabela 19 – Incertezas dos sensores para as medições.....	76
Tabela 20 – Resumo do procedimento de calibração dos NTCs.....	78
Tabela 21 – Limites de carga para o mCHP-Ex.....	79
Tabela 22 – Condições de operação nos ensaios experimentais.....	80
Tabela 23 – Comparativo dos mCHP experimentais de ciclo Otto com arrefecimento a ar..	103
Tabela 24 – Comparativo do mCHP-Ex com os sistemas hipotéticos compostos.....	103
Tabela 25 – Dados estatísticos da calibração do MAF-2.....	122
Tabela 26 – Relações entre U e m para diferentes diâmetros de carcaça do MAF.....	123
Tabela 27 – Projeção dos valores de fluxo para a faixa de tensão usual do mCHP-Ex.....	124
Tabela 28 – Resultados do procedimento de calibração dos NTCs.....	126
Tabela 29 – Incertezas combinadas dos NTCs.....	127
Tabela 30 – Incertezas tipo B das medições pontuais.....	128
Tabela 31 – Incertezas das diferenças de temperatura.....	131
Tabela 32 – Incertezas das potências de recuperação térmica.....	132

Tabela 33 – Incertezas das eficiências.....	133
Tabela 34 – Incertezas de outras relações e taxas	134
Tabela 35 – Condições ambientais e frequência de rotação.....	135
Tabela 36 – Temperaturas no fluxo de ar de admissão/gases de exaustão.....	136
Tabela 37 – Temperaturas no fluxo de ar de arrefecimento	137
Tabela 38 – Temperaturas no fluxo de água.....	138
Tabela 39 – Temperaturas do motor e no fluxo de óleo.....	139
Tabela 40 – Vazões mássicas nos fluxos.....	140
Tabela 41 – Tempo, massa de combustível, tensão e corrente.....	141
Tabela 42 –Taxa de consumo, eficiência volumétrica, relação A_f e fator λ	142
Tabela 43 – Potências de entrada e saída do mCHP-Ex.....	143
Tabela 44 – Potências de recuperação térmica parciais	144
Tabela 45 – Eficiências.....	145
Tabela 46 – Relação $P_{el}P_{hr, tot}$ e consumos específicos.....	146
Tabela 47 – Estimativa das perdas nos fluxos de ar e gases de exaustão.....	147

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AND	Operador booleano “E”
BCHP	Resfriamento, aquecimento e energia de edifícios (<i>Building Cooling, Heating, and Power</i>)
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CCHP	Resfriamento, aquecimento e energia combinados (<i>Combined Cooling, Heating, and Power</i>)
CHP	Sistema combinado de calor e energia (<i>combined heat and power</i>)
CHPB	Resfriamento, aquecimento e energia para edifícios (<i>Cooling, Heating, and Power for Buildings</i>)
CO	Monóxido e carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
ORC	Ciclo orgânico de Rankine
DER	Recursos de energia distribuída (<i>Distributed Energy Resources</i>)
EPO	Escritório europeu de patentes
FC	Célula combustível
FU	Fator de utilização
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GN	Gás natural
H ₂	Hidrogênio
HE-1	Trocador de calor 1 (ar de arrefecimento)
HE-2	Trocador de calor 2 (óleo)
HE-3	Trocador de calor 3 (gases de exaustão)
IES	Sistemas de energia integrados (<i>Integrated Energy Systems</i>)
IMPI	Instituto nacional de propriedade industrial
LATPAT	Base de patentes da América Latina e Espanha
MAF	Medidor de vazão mássica de ar
MAF-1	Medidor de vazão mássica do ar de admissão
MAF-2	Medidor de vazão mássica do ar de arrefecimento
MCI	Motor de combustão interna

MCR	Microciclo de Rankine
SE	Motor Stirling
MTG	Microturbina a gás
NO _x	Óxidos de nitrogênio
OR	Operador booleano “OU”
PCI	Poder calorífico inferior
PES	Índice de Economia da Energia Primária
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
RSL	Revisão sistemática de literatura
RV	Veículo recreativo (<i>recreational vehicle</i>)
TG	Turbina a gás
WIPO	Organização mundial da propriedade intelectual

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS MAIÚSCULAS

A/f	Relação entre as massas de ar e combustível
D	Diâmetro [mm]
FU	Fator de utilização [-]
I	Corrente elétrica [I]
I_A	Incerteza tipo A [-]
I_B	Incerteza tipo B [-]
I_C	Incerteza tipo C [-]
I_I	Incerteza da corrente elétrica [A]
I_m	Incerteza da massa [g]
$I_{méd}$	Incerteza média [-]
$I_{\dot{m}_a}$	Incerteza da vazão mássica do ar de arrefecimento [g/s]
$I_{\dot{m}_f}$	Incerteza da vazão mássica de combustível [g/s]
$I_{\dot{m}_g}$	Incerteza da vazão mássica do ar de admissão [g/s]
$I_{\dot{m}_w}$	Incerteza da vazão mássica de água [g/s]
$I_{P_{el}}$	Incerteza da potência elétrica [kW]
I_{P_f}	Incerteza da potência de entrada [kW]
$I_{P_{hr,a}}$	Incerteza da potência térmica do ar de arrefecimento [kW]
$I_{P_{hr,g}}$	Incerteza da potência térmica dos gases de exaustão [kW]
I_R	Incerteza final propagada [-]
I_t	Incerteza do tempo [s]
I_U	Incerteza da tensão [V]
I_1, I_2, \dots, I_n	Incertezas individuais dos instrumentos
N	Frequência de rotação [rpm]
P	Potência [kW]
PCI	Poder calorífico inferior [kJ/kg]
PCI_{comb}	Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]
P_{el}	Potência elétrica [kW]

P_f	Potência de entrada [kW]
$P_{hr,tot}$	Potência de recuperação térmica total [kW]
$P_{hr,a}$	Potência térmica do ar de arrefecimento [kW]
$P_{hr,g}$	Potência térmica dos gases de exaustão [kW]
P_{net}	Potência líquida total de saída [kW]
T_g	Temperatura dos gases de exaustão [°C]
T_a	Temperatura do ar de arrefecimento [°C]
T_w	Temperatura da água [°C]
T_e	Temperatura do motor [°C]
U	Tensão [V]
U_{MAF-1}	Tensão no MAF-1 [V] ou [mV]
U_{MAF-2}	Tensão no MAF-2 [V] ou [mV]
V_{desl}	Deslocamento volumétrico [cm ³]
$V_{máx}$	Volume máximo [cm ³]
$V_{mín}$	Volume mínimo [cm ³]

LETRAS MINÚSCULAS

$c_{p,a}$	Calor específico do ar de arrefecimento [kJ/kg·K] ou [kJ/kg·°C]
$c_{p,g}$	Calor específico do ar de admissão/gases de exaustão [kJ/kg·K] ou [kJ/kg·°C]
c_p	Calor específico a pressão constante [kJ/kg·K] ou [kJ/kg·°C]
c_v	Calor específico a volume constante [kJ/kg·K] ou [kJ/kg·°C]
k	Relação entre calores específicos do fluido de trabalho [-]
\dot{m}_g	Vazão mássica do ar de admissão/gases de exaustão [g/s]
\dot{m}_a	Vazão mássica do ar de arrefecimento [g/s]
\dot{m}_f	Taxa de consumo de combustível [g/s]
\dot{m}_w	Vazão mássica de água [g/s]
n	Número de medições efetuadas
r	Relação de compressão [-]
s	Curso [mm]
t	Tempo [s]

LETRAS GREGAS

η_{el}	Eficiência elétrica [-]
$\eta_{hr,tot}$	Eficiência de recuperação térmica total [-]
$\eta_{t,otto}$	Eficiência térmica do ciclo Otto [-]
η_v	Eficiência volumétrica [-]
λ	Coefficiente teórico de excesso de ar [-]
ρ_{ar}	Densidade do ar [kg/m ³]
σ	Desvio padrão amostral [-]
$\bar{\sigma}$	Desvio padrão da média [-]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	ARTIGOS SOBRE COGERAÇÃO PARA RVS.....	20
1.2	PATENTES SOBRE RECUPERAÇÃO TÉRMICA E COGERAÇÃO PARA RVS .	20
1.3	TEMA.....	21
1.4	DELIMITAÇÃO DO TEMA	21
1.5	OBJETIVOS	22
1.5.1	Objetivo geral.....	22
1.5.2	Objetivos específicos	22
1.6	JUSTIFICATIVA	22
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
2.1	MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA ALTERNATIVOS.....	25
2.2	ALTERNADORES.....	28
2.2.1	Alternadores automotivos	28
2.3	GRUPOS MOTO-GERADORES	29
2.3.1	Moto-geradores portáteis de corrente alternada	29
2.4	ENERGIA ELÉTRICA EM RVS.....	31
2.4.1	Baterias estacionárias.....	31
2.4.2	Inversores, conversores e carregadores	32
2.4.3	Sistemas fotovoltaicos para RVs.....	33
2.5	CLIMATIZAÇÃO DE RVS.....	34
2.5.1	Sistemas de aquecimento para RVs	35
2.6	SISTEMAS COMBINADOS DE CALOR E ENERGIA	36
3	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	38
3.1	PLANEJAMENTO DA REVISÃO SISTEMÁTICA	39
3.1.1	Definição das estratégias de busca	39
3.1.2	Critérios de exclusão e inclusão.....	40
3.2	EXECUÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA	41
3.3	SELEÇÃO DOS DOCUMENTOS ELEGÍVEIS PARA A PESQUISA	42
3.4	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	43
3.4.1	Principais palavras-chave	43
3.4.2	Evolução das pesquisas ao longo dos anos.....	44

3.4.3	Produtividade e influência dos autores.....	44
3.4.4	Principais instituições.....	45
3.4.5	Países com publicações no <i>corpus</i> de análise.....	46
3.4.6	Revistas científicas com maior número de publicações.....	46
3.4.7	Artigos mais influentes.....	47
3.5	RESULTADOS DA RSL.....	47
3.5.1	Análise dos artigos elegíveis a partir das buscas.....	48
3.5.2	Bola de neve.....	55
3.5.3	Resumo das características técnicas dos equipamentos.....	60
3.6	CONCLUSÕES DA RSL.....	62
4	METODOLOGIA.....	63
4.1	CONSTRUÇÃO DO MCHP-EX.....	63
4.2	DEFINIÇÕES E INSTRUMENTAÇÃO.....	70
4.2.1	Instrumentação do mCHP-Ex.....	73
4.2.2	Calibração dos sensores MAF.....	76
4.2.3	Calibração dos termistores NTC.....	77
4.3	PREPARAÇÃO DO ENSAIO DO MCHP-EX.....	78
4.3.1	Definição dos limites de carga do mCHP-Ex.....	78
4.3.2	Planejamento do ensaio do mCHP-Ex.....	79
4.4	COMBINAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS.....	81
5	RESULTADOS.....	83
5.1	MEDIÇÕES PRIMÁRIAS.....	83
5.1.1	Temperaturas dos fluxos.....	84
5.1.2	Vazões mássicas dos fluxos de ar e água.....	87
5.1.3	Variação da massa de combustível, tempo, tensão e corrente no alternador.....	89
5.1.4	Dados secundários.....	89
5.2	GRANDEZAS DE INTERESSE.....	92
5.2.1	Potências.....	92
5.2.2	Eficiências.....	97
5.2.3	Dados complementares.....	104
5.2.4	Estimativas das perdas nos fluxos de ar e gases de exaustão.....	106
6	CONCLUSÕES ESUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	108
	REFERÊNCIAS.....	111
	APÊNDICE A – SISTEMAS ELÉTRICOS DO MCHP-EX.....	118

APÊNDICE B – PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DOS MAFS.....	121
APÊNDICE C – PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DOS NTCS	126
APÊNDICE D – DETERMINAÇÃO DAS INCERTEZAS.....	128
APÊNDICE E – TABELAS DE RESULTADOS DO ENSAIO DO MCHP-EX.....	135
APÊNDICE F – PROTOCOLO PRISMA DA RSL	150

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho trata de uma pesquisa experimental de avaliação da capacidade de um sistema micro CHP, para atender as demandas energéticas de veículos recreativos, popularmente chamados de RVs (do inglês, *recreational vehicle*).

RV é um termo amplo usado para descrever um *motorhome* ou trailer que possui alojamentos e é projetado para fornecer acomodação. Embora possa se pensar que um RV é obrigatoriamente um veículo grande como um ônibus, na verdade podem apresentar diversos formatos e tamanhos. Quando se trata de RVs, existem três categorias principais: *motorhomes*, trailers e *campers*. Os *motorhomes* são parte veículo e parte casa, o que significa que eles podem ser conduzidos sem ter nada para rebocá-los. Os trailers, por outro lado, requerem outro veículo com capacidade de reboque para tracioná-los. E finalmente, um *camper*, que não é nem trailer nem *motorhome*, trata-se de uma pequena cabine projetada para caber na carroceria de uma caminhonete. A estrutura é removível, ou seja, pode ser instalada e retirada da caminhonete conforme a necessidade e geralmente tem um avanço sobre a cabine da mesma (DUNDAS, 2020).

Um RV é concebido para ser independente de fonte de energia externa, ao menos por algum período. O veículo deve manter, com sua própria bateria, seus equipamentos mínimos, como iluminação interna, TV, ventilador e principalmente a bomba d'água que pressuriza a água do reservatório para chuveiro e torneiras. O mais adequado é que os equipamentos básicos operem na tensão de 12 Volts em corrente contínua (CC). Para outros eletrodomésticos que consomem mais energia ou para longos períodos de utilização do RV, pode se conectar o veículo em uma tomada externa (MOTOR TRAILER DO BRASIL, 2018).

Nos trailers, assim como nos *motorhomes*, geralmente, são instaladas luminárias de LED de 12 V CC, possibilitando a alimentação diretamente da bateria, sem necessidade de conexão externa com uma rede elétrica. Como a caixa d'água encontra-se sob o assoalho do veículo, uma bomba d'água, operando em 12 V CC, é necessária para a utilização da água. O aquecimento de água é geralmente realizado por meio de aquecedor a combustão de gás liquefeito de petróleo (GLP), portanto, sem necessidade de energia elétrica. Quanto à geladeira, a não ser que esta possua um compressor que opere em 12 V CC, geralmente precisa de alimentação de 110 V em corrente alternada (CA) ou 220 V CA. Sendo assim, para alimentar este equipamento se faz necessário o uso de um inversor de frequência, que recebe tensão 12 V CC e entrega energia à geladeira, ou outros dispositivos como um micro-ondas ou tomadas de uso geral, nas tensões de 127 V CA ou 220 V CA (ATAULO, 2016).

O inversor de frequência é um dispositivo muito útil em um RV, entretanto, não são todos os equipamentos que podem ser conectados a ele, pois, além da limitação de potência, o uso de um equipamento de maior consumo pode descarregar rapidamente um banco de baterias (MOTOR TRAILER DO BRASIL, 2018).

Até mesmo um grande banco de baterias, que proporcione elevada autonomia, precisa ser recarregado. Isso pode ser feito conectando-se o RV em alguma fonte externa de alimentação, o que aciona o carregador de baterias. Com a instalação de módulos fotovoltaicos a recarga das baterias pode ser feita tanto em deslocamento quanto com o veículo estacionado, desde que haja incidência solar (ATAULO, 2016). No caso dos *motorhomes*, estes podem ter suas baterias recarregadas pelo alternador do veículo, quando em deslocamentos. (PIVARI, 2000).

Atualmente, muitos são os veículos recreativos equipados com os sistemas fotovoltaicos para manter as baterias carregadas, entretanto, em períodos de clima nublado, pode ser necessária uma alternativa para recarga de energia. Quando não há possibilidade de conexão com a rede elétrica, moto-geradores portáteis a combustão são a alternativa adotada por caravanistas (termo que define usuários de RVs) como *backup* de energia. Os moto-geradores *inverter* são os preferidos para esta finalidade, já que são portáteis e geralmente mais silenciosos, pois, além de serem enclausurados em uma carcaça que atenua o ruído, operam com frequência de rotação variável adaptável à carga. A Tabela 1 apresenta alguns exemplos de moto-geradores *inverter*, com potência contínua entre 1,6 kW e 2,2 kW, disponíveis no mercado brasileiro, onde constam dados técnicos disponibilizados pelos fabricantes.

Tabela 1 – Alguns exemplos de moto-geradores *inverter* disponíveis no mercado brasileiro

Equipamento Fabricante e modelo	Potência (kW) contínua/pico	Ruído (dB) a 7 m	Massa (kg)	V_{dest} (cm ³)	Consumo (L/h)	Fonte
Branco B4T 2000i	1,8/2,2	54 a 69	22	105,6	0,685*	Branco (2021)
Buffalo BFG 2500	2,2/2,5	62,5	22,8	98	0,700**	Buffalo (2017)
Honda EU22i	1,8/2,2	90	21,2	121	1,400	Honda (2021)
Toyama TG2000i	1,6/1,8	61	21	79	-	Toyama (2020)

*consumo a 50% de carga

**consumo médio

Fonte: Elaborado pelo autor.

Porém, um moto-gerador *inverter* tem um alto custo de aquisição e como seu uso é esporádico em um RV, acaba não sendo uma prioridade de compra. Boa parte do valor do produto se justifica pela existência de um módulo eletrônico (inversor) que “desenha” a onda senoidal. Entretanto, para recarregar baterias utiliza-se energia elétrica CC e quando o

carregador retifica a forma senoidal CA em CC, toda esta tecnologia é dispensável. Para esta finalidade, algo simples como um alternador automotivo já seria suficiente.

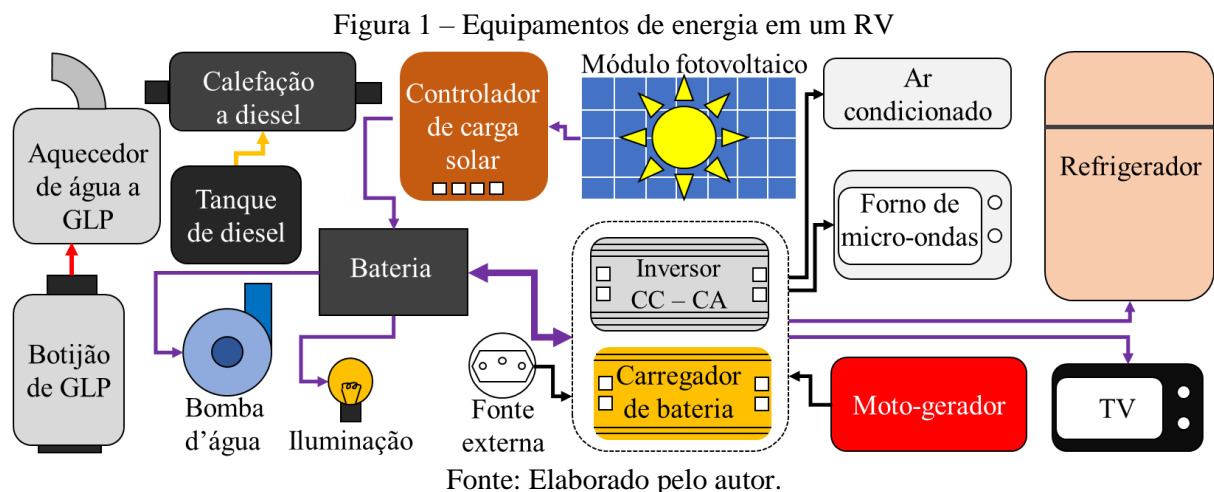
Existem moto-geradores portáteis CC comerciais, porém, não são fáceis de encontrar no mercado nacional e mesmo no mercado internacional, a maioria não é silenciado. Podem ser utilizados para recarregar baterias automotivas, de embarcações e de veículos de recreativos, além de outras finalidades onde se deseja energia CC em baixa tensão. Geralmente são especificados por sua tensão e corrente nominais. A Tabela 2 lista alguns exemplos de moto-geradores CC.

Tabela 2 – Alguns exemplos de moto-geradores de corrente contínua

Equipamento Fabricante e modelo	Tensão (V)	Corrente (A)	Ruído (dB) a 7 m	Massa (kg)	V_{dest} (cm ³)	Origem	Fonte
PortaCharger PC 1240	12	40	-	-	121	EUA	Portacharger (2021)
ALTEN G1 Gasoline DC Generator	12 / 24	120 / 45	74	26	160	EUA	Alten (2020)
Maverick DC portable generator 6 kW	24 / 48	250 / 125	-	37	390	EUA	Wildcat (2021)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além das necessidades de energia elétrica, a climatização de um RV também é importante, principalmente em regiões de clima severo. No mercado brasileiro a maioria dos RVs conta com climatização por ar-condicionado *split* que pode ser somente de ciclo frio ou de ciclos quente e frio. Já alguns veículos importados têm sistema ar-condicionado para resfriar e calefação a GLP para aquecimento. No Item 2.5 são mostrados exemplos e dados dos sistemas de climatização de alguns trailers comercializados no Brasil. A Figura 1 mostra os equipamentos típicos dos sistemas de energia elétrica e térmica de um RV, e suas interconexões.



Uma possível alternativa, mais econômica e ecológica, seria combinar a geração de energia elétrica e térmica em um único dispositivo. Essa tecnologia é, logicamente, conhecida e bem difundida para aplicações residenciais e industriais, chamada de sistema combinado de calor e energia, ou sistema CHP, onde a sigla é referente ao termo em inglês *combined heat and power*.

Sistemas CHP, são sistemas de cogeração, onde há produção simultânea de energia elétrica, ou mecânica, e energia térmica útil a partir de uma única fonte de energia. Sistemas CHP operam de forma que a energia térmica de um efluente, que de outra forma seria rejeitada para o ambiente, é recuperada e torna-se disponível para utilização (ASHRAE, 2016).

1.1 ARTIGOS SOBRE COGERAÇÃO PARA RVS

São poucas as publicações científicas sobre CHP para aplicação específica em RVs, alguns exemplos são: Engelhardt *et al.* (2014) e Engelhardt *et al.* (2012), abordando reformadores a vapor para células combustíveis de sistemas CHP dedicados a RVs. Bragg (1978) e Johansson (1978) propuseram sistemas CHP dedicados a RVs com motores Stirling. O trabalho de Werner e Barber (1973), sobre a seleção de fluidos de trabalho para pequenos ciclos Rankine de sistemas CHP dedicados a RVs.

Além destes, outros trabalhos sobre CHP citam a possibilidade de utilizar os dispositivos em RVs, como por exemplo: Shinohara (2014), Kendall *et al.* (2013), Dyson (2012), Kolb, *et al.* (2011), Choi, *et al.* (2009) e Walker e Fauvel (1986).

1.2 PATENTES SOBRE RECUPERAÇÃO TÉRMICA E COGERAÇÃO PARA RVS

Alguns dispositivos patenteados para RVs apresentam características de recuperação térmica. Perez e Sierra (2007), Hua e Jinan (2016) e Berthold (1986) que preveem recuperação a partir do sistema de arrefecimento do motor do veículo para aquecimento de água no RV. Outros inventores propõem dispositivos de recuperação térmica dos gases de exaustão dos motores de RVs, sendo Xichun e Shen (2020) e Shuhe (2018) com invenções voltada para *motorhomes*, e Louis (1982), (1982), (1983) e (1983) que prevê a instalação em veículos tracionadores de trailers.

Outras invenções propõem dispositivos de geração de energia elétrica destinados a RVs, alguns utilizando a geração termoelétrica *Peltier* como é o caso de Decai (2022) que propõe geração por fonte solar, Curtis (1998) com geração a partir dos gases de exaustão e Applic Gaz

As (1971) propondo um sistema de geração termoelétrica a partir queima de combustível em uma câmara. Um sistema semelhante a um ciclo Rankine foi proposto por Kechong, Xiangrong e Hongqing (2017) trata-se de um complexo sistema de reciclagem de gases de exaustão para *motorhomes*.

Outras patentes registradas combinam a cogeração de energias elétrica e térmica. Klaus (2003) patenteou um sistema geração de energia elétrica para RVs a partir de uma célula combustível, a proposta prevê o aproveitamento do calor residual para aquecimento de ar para climatização do RV. Já invenção de Hengzhi (2018) trata de um dispositivo combinado de eletricidade e calor, utilizando como fontes de energia elétrica o alternador original do veículo e um sistema fotovoltaico, recuperação térmica do motor a combustão do próprio veículo. Já invenção registrada por Song An e Song Yijin (2020) pode ser considerada um típico sistema micro CHP para RVs a partir de MCI. Composto por um moto-gerador fornecendo energia para alimentar um carregador de baterias e garantir energia para ao veículo, e dois recuperadores de calor. Um deles aproveita a energia térmica residual nos gases de exaustão e o outro recupera energia térmica do sistema de arrefecimento do moto-gerador por circulação de água.

Pela pesquisa realizada nos bancos de patentes, pode-se perceber que apenas uma invenção, Song An e Song Yijin (2020), prevê a recuperação térmica de um grupo gerador fornecendo energia elétrica e calor a um RV.

1.3 TEMA

Para possibilitar a utilização confortável de um RV, suas demandas de energia térmica e elétrica devem ser atendidas. Este trabalho propõe a utilização de um sistema micro CHP dedicado ao fornecimento de energia elétrica e térmica para RVs. A pesquisa consiste em avaliar a disponibilidade de energias térmica e elétrica em um micro CHP Experimental CC (mCHP-Ex), que poderia fornecer energia elétrica, para recarregar as baterias do veículo e energia térmica para climatização do RV ou aquecimento de água para banho e outros fins.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O trabalho limita-se a avaliações teórico-experimentais em laboratório, sem considerar a avaliações do dispositivo instalado em RV, tampouco o ciclo de vida do produto ou qualquer tipo de análise de viabilidade econômica. Os principais parâmetros avaliados compreendem potência de entrada, potência de saída térmica, potência de saída elétrica e suas respectivas

eficiências. Além disso, são avaliados outros parâmetros relacionados a operação do moto-gerador, como por exemplo a relação ar/combustível (A/F) e o coeficiente de excesso de ar λ . O mCHP-Ex construído para os ensaios não é um produto comercial, portanto, não foram feitas avaliações de durabilidade do equipamento.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de um sistema micro CHP dedicado ao fornecimento de calor e eletricidade a veículos recreativos visando obter maior eficiência global para esse tipo de aplicação.

1.5.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) desenvolver um dispositivo micro CHP experimental instrumentado no intuito de obter um equipamento que possibilite as avaliações propostas;
- b) avaliar a disponibilidade de potências térmica e elétrica deste micro CHP experimental em diversas condições de demandas de energia de um RV;
- c) comparar o protótipo de sistema micro CHP com os sistemas convencionais de geração de energia térmica e elétrica para RVs.

1.6 JUSTIFICATIVA

As alternativas atualmente disponíveis, moto-gerador portátil e aquecedor a combustão, não atendem de forma combinada essas duas necessidades, o que implica no desperdício de energia. Assim, o trabalho justifica-se na proposta de estudar a viabilidade de recuperação térmica de um moto-gerador de energia elétrica para climatização ou aquecimento de água para RVs.

A pesquisa consiste em investigar se um sistema micro CHP pode fornecer energia térmica suficiente para aquecimento do ambiente ou de água em um RV. Bem como energia elétrica suficiente para recarregar as baterias do RV, o que seria adequado para períodos noturnos ou nublados, quando os módulos fotovoltaicos, eventualmente instalados, não fornecem geração suficiente.

Supondo a utilização do RV por um casal, com dois banhos diários, entende-se que, com a instalação do sistema micro CHP, durante o tempo de operação necessário ao processo de aquecimento de água para os banhos, o moto-gerador estaria repondo energia elétrica consumida da bateria pelos equipamentos elétricos instalados no veículo. Nesse caso, o objetivo principal é o aquecimento de água e a energia elétrica seria cogenerada.

Todavia, a estratégia inversa também seria possível, com a utilização de um reservatório de água quente, a energia térmica poderia ser armazenada durante os períodos de operação do moto-gerador em que o objetivo principal seria de gerar energia elétrica. Nesse caso a energia térmica seria cogenerada.

Na revisão sistemática de literatura constam diversos artigos avaliando sistemas micro CHP para uso residencial, onde, em sua maioria, são utilizados motores com arrefecimento líquido acoplados a geradores CA e operando com gás natural (GN). Diferente disso, nesta pesquisa, pretende-se avaliar a geração combinada de calor e energia em um micro CHP experimental com saída de energia CC, específico para utilização em RVs, operando com gasolina.

Pela análise das patentes sobre recuperação térmica, realizada previamente à RSL, identificou-se que existe somente um registro de invenção onde a recuperação térmica é feita de um moto-gerador, para aquecimento de água ou climatização de um RV.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento de tese apresenta no Capítulo 1 uma introdução, onde são brevemente explanadas as peculiaridades sobre veículos recreativos, suas necessidades de energia e os dispositivos atuais para suprir essas necessidades. Ainda no Capítulo 1 constam o tema e sua delimitação, os objetivos do trabalho e a justificativa.

No Capítulo 2 foi descrita a fundamentação teórica básica sobre os assuntos estudados e pesquisados para o entendimento e desenvolvimento do trabalho. Consta também no Capítulo 2 a teoria básica sobre sistemas combinados de calor e energia, motores de combustão interna (MCI), alternadores, moto-geradores e dispositivos de energia e climatização para RVs.

No capítulo 3 é feita a Revisão Sistemática de Literatura (RSL), sobre sistemas micro CHP. Nesta RSL buscou-se responder a questões específicas sobre micro CHP, por meio de buscas em bases de dados científicos.

No Capítulo 4 consta toda a metodologia de concepção do mCHP-Ex, o planejamento dos ensaios realizados, os materiais, os instrumentos e suas incertezas, bem como a previsão das incertezas combinadas e propagadas.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos, por meio de tabelas e gráficos, os resultados dos ensaios operacionais do mCHP-Ex, valores de incerteza final. Além dos dados de potência e eficiência, outras características como relação (A/F) e fator λ também são avaliados.

No Capítulo 6 são feitas conclusões e considerações sobre as atividades realizadas, e as possibilidades de continuação do trabalho.

Por fim são listadas as referências bibliográficas consultadas para o desenvolvimento do trabalho e os apêndices com informações sobre a construção e instrumentação do mCHP-Ex, calibração de sensores, determinação das incertezas e tabelas de registros dos ensaios operacionais.

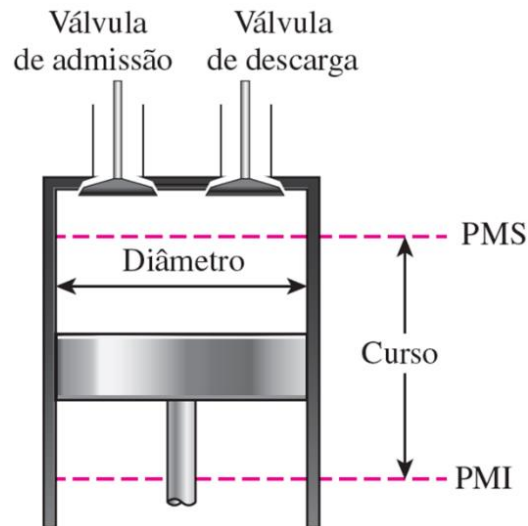
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao longo deste capítulo é realizada uma abordagem dos conceitos teóricos básicos sobre motores, alternadores, moto-geradores. Além disso, o capítulo contém as descrições e peculiaridades dos equipamentos de veículos recreativos, como: baterias, inversores, conversores, carregadores de baterias, bem como os requisitos de energia, sistemas fotovoltaicos e sistemas de climatização para RVs.

2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA ALTERNATIVOS

Motores alternativos são máquinas térmicas de combustão interna cujo funcionamento baseia-se em um sistema pistão-cilindro. O pistão de diâmetro D movimenta-se pelo curso s alternando entre as posições chamadas de ponto morto superior (PMS) e ponto morto inferior (PMI). As válvulas de admissão e descarga controlam o fluxo do fluido de trabalho entrando e saindo do sistema. Na Figura 2 pode-se observar a nomenclatura dos componentes básicos desse sistema (ÇENGEL e BOLES, 2013).

Figura 2 – Nomenclatura de um motor alternativo



Fonte: Adaptado de Çengel e Boles (2013).

Com o pistão no PMS o volume do sistema é mínimo (V_{min}) e com o pistão no PMI o volume do sistema é máximo ($V_{máx}$). O deslocamento volumétrico (V_{desl}) pelo sistema corresponde à diferença entre $V_{máx}$ e V_{min} . A determinação deste deslocamento volumétrico pode ser feita pelas Equações (1) e (2) (ÇENGEL e BOLES, 2013).

$$V_{desl} = V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n} \quad (1)$$

$$V_{desl} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot s}{4} \quad (2)$$

O ciclo Otto é o ciclo termodinâmico ideal para os motores alternativos de ignição por centelha. Na análise termodinâmica de motores alternativos podem ser utilizadas as hipóteses do ciclo padrão a ar, que são:

- a) o fluido de trabalho é o ar, que circula continuamente em um circuito fechado e sempre considerado um gás ideal;
- b) todos os processos do ciclo são internamente reversíveis;
- c) o processo de combustão é substituído por um processo de fornecimento de calor a partir de uma fonte externa;
- d) o processo de exaustão é substituído por um processo de rejeição de calor onde o fluido de trabalho é restaurado ao seu estado inicial.

Com essas simplificações, a eficiência térmica do ciclo Otto ($\eta_{t,Otto}$) depende exclusivamente da relação de compressão (r) e da relação entre os calores específicos do fluido de trabalho (k), conforme Equações (3), (4) e (5), respectivamente.

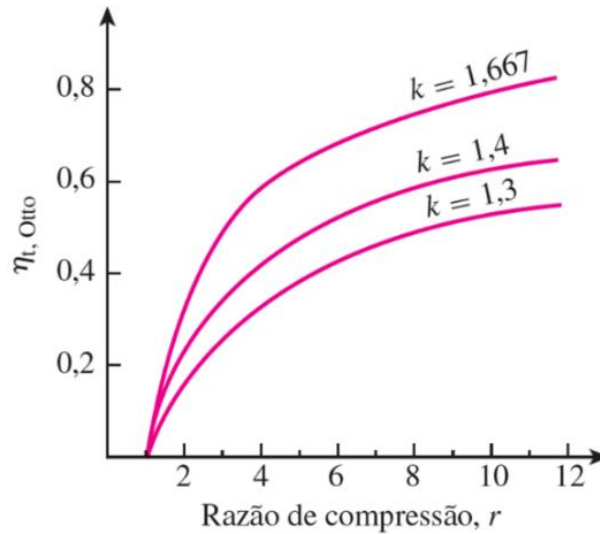
$$\eta_{t,Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad (3)$$

$$r = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}} \quad (4)$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (5)$$

sendo (c_p) o calor específico a pressão constante e (c_v) o calor específico a volume constante. A Figura 3 ilustra a eficiência térmica do ciclo Otto ideal em função da razão de compressão para diferentes valores de relação entre os calores específicos do fluido de trabalho (ÇENGEL e BOLES, 2013).

Figura 3 – Eficiência do ciclo Otto ideal para diferentes valores de r e k



Fonte: Adaptado de Çengel e Boles (2013).

Para gases monoatômicos como o argônio ou hélio, o valor de k fica em torno de 1,667, resultando em uma eficiência térmica maior. Para o ar atmosférico a relação entre os calores específicos cai para aproximadamente 1,4 e para o dióxido de carbono 1,3. Razões de compressão típicas, para motores de ciclo Otto a gasolina, ficam entre 8 e 11 e nesta faixa, nota-se no gráfico da Figura 3 que a eficiência atinge valores próximos de 60% na operação com ar atmosférico ($k = 1,4$). O fato é que em condições reais, a eficiência térmica dos motores alternativos de ignição por centelha é bem menor do que a eficiência térmica no ciclo ideal. Perdas por atrito e outras irreversibilidades não são consideradas na análise ideal. Com isso, os valores típicos de eficiência térmica para motores reais variam entre 25 e 30% (ÇENGEL e BOLES, 2013).

O desempenho dos MCI pode ser afetado por diversos fatores, sendo um deles o fluxo de ar e o enchimento dos cilindros. Um parâmetro que quantifica o enchimento é a eficiência volumétrica, sendo esta, a relação entre a vazão mássica real do motor e a vazão mássica teórica referente a um determinado volume de cilindros, frequência de rotação e condições termodinâmicas do fluido. Brunetti (2012) define a eficiência volumétrica η_v pela Equação (6)

$$\eta_v = \frac{2 \cdot \dot{m}_g}{\rho_{ar} \cdot V_{desl} \cdot N} \quad (6)$$

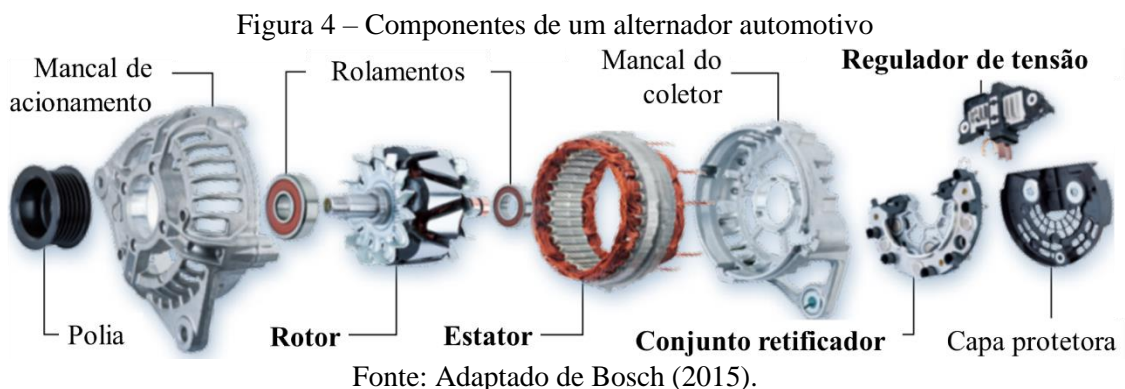
onde \dot{m}_g é a vazão mássica de ar de admissão, ρ_{ar} é a massa específica do ar atmosférico, V_{desl} é o deslocamento volumétrico do motor e N é a frequência de rotação do motor (em rotações por segundo). O multiplicador “2” no numerador é utilizado para motores de quatro tempos.

2.2 ALTERNADORES

Alternadores ou geradores síncronos são máquinas síncronas utilizadas para converter potência mecânica em potência elétrica na forma de corrente alternada. Em um alternador, um campo magnético é produzido no rotor, que pode ser de ímã permanente ou de um eletroímã alimentado por CC. O rotor do gerador é então acionado por uma máquina motriz primária e produz um campo magnético girante dentro da máquina, que, por sua vez, induz um conjunto de tensões trifásicas CA nos enrolamentos de estator do gerador. A potência de entrada do alternador é a potência mecânica entregue ao seu eixo, proveniente da máquina primária de acionamento. A potência de saída de um alternador é a potência elétrica disponível nos seus terminais elétricos. Logicamente a potência de saída é sempre menor do que a potência de entrada, e a diferença entre elas corresponde a todas as perdas da máquina elétrica (CHAPMAN, 2013).

2.2.1 Alternadores automotivos

Os alternadores automotivos são basicamente geradores síncronos com um conjunto retificador formado por uma ponte de diodos que converte a tensão CA trifásica em CC. Além do conjunto retificador, estes alternadores são compostos por um rotor, um estator, um regulador de tensão e outras partes. Acionado pelo motor do veículo por meio de uma correia, o alternador converte a energia mecânica em energia elétrica que serve para manter carregada a bateria e alimentar os consumidores durante o funcionamento do veículo, como os sistemas de ignição, injeção e os demais equipamentos elétricos. A Figura 4 mostra os componentes típicos de um alternador automotivo (BOSCH, 2015).



O rotor de um alternador automotivo é construído sobre um eixo de aço, onde é fixada uma bobina de cobre envolvida por um par de rodas polares. Quando a chave de ignição é

ligada, o rotor recebe da bateria a tensão que induzirá nos fios da bobina uma corrente elétrica CC. Esta corrente produz o campo magnético que se torna um campo girante quando se inicia o movimento de rotação do rotor. No estator, onde é produzida a corrente elétrica, as bobinas de fios de cobre são fixadas sobre um núcleo constituído em aço. A corrente elétrica é induzida pelo campo magnético criado pelo rotor, agindo nos fios do estator. O conjunto retificador, também conhecido como placa de diodos, tem a função de transformar em corrente contínua a corrente alternada, produzida no alternador e que não serve para alimentar os equipamentos elétricos do veículo nem para carregar a bateria. Através dos contatos das escovas com o coletor do rotor, o regulador de tensão monitora e regula a tensão de saída do alternador, mantendo-a constante independente das condições de carga (BOSCH, 2015).

Um alternador automotivo operando em rotações médias e com cargas parciais apresenta o grau de eficiência na faixa de 50% (BOSCH, 2005).

2.3 GRUPOS MOTO-GERADORES

Um grupo moto-gerador ou simplesmente moto-gerador é um equipamento que converte energia térmica em energia mecânica e depois em energia elétrica. Basicamente é composto por um uma máquina térmica, que pode ser um motor de combustão interna, e uma máquina elétrica, geralmente um alternador. Estes dois componentes são montados em uma base juntamente com outros elementos e acoplados de forma que o motor entregue potência por meio de sua árvore ao eixo do alternador (GRUPEL, 2020).

Os motores dos moto-geradores podem ser a diesel, gasolina, etanol, biogás, GLP, GN, além de outros combustíveis. Os ciclos podem ser de 2 ou 4 tempos e em moto-geradores maiores os motores contam com turbocompressor. Os modelos de menor potência são equipados com carburadores ou injeção mecânica, já os modelos maiores podem contar com sistema de injeção eletrônica de combustível (STEMAC, 2021).

2.3.1 Moto-geradores portáteis de corrente alternada

Os moto-geradores portáteis, que também podem ser chamados de moto-geradores de *backup*, têm sua aplicação principal em necessidades temporárias de energia elétrica, onde quer que seja necessário. O termo portátil é relativo, pois alguns equipamentos podem ser mais ou menos portáteis que outros. Em geral, são chamados de moto-geradores portáteis aqueles que

podem ser transportados por uma ou duas pessoas. A maioria possui alças e alguns são dotados de rodas (POPULAR MECHANICS, 2021).

Dentre os diversos modelos de moto-geradores portáteis, existem os do tipo inversores, conhecidos como moto-geradores *inverter*. São diferentes dos outros moto-geradores em função da sua forma de funcionamento. Assim como maioria dos moto-geradores, os do tipo inversores fornecem energia CA na tensão da rede de distribuição residencial. A geração também é feita em CA, porém, é convertida para CC e, em seguida, invertida novamente para CA. Estas etapas de conversão e inversão são controladas por circuitos eletrônicos que filtram e nivelam os surtos, limpando a onda senoidal da corrente elétrica (POPULAR MECHANICS, 2021).

A revista *Popular Mechanics* (2021) testou alguns modelos de moto-geradores portáteis, avaliando os aspectos de potência, ruído, massa, entre outros. A Tabela 3 mostra um compilado dos resultados dos testes realizados.

Tabela 3 – Comparativo de moto-geradores portáteis

Equipamento Fabricante e modelo	Combustível	Potência (W) contínua / pico	Ruído (dB) a 0,601 m / 7,62 m	Massa (kg)	V_{dest} (cm ³)
Honda EU2200i Companion	Gasolina	1800 / 2200	81,2 / 59,9	21,09	121
Briggs & Stratton 3500 Watt Portable	Gasolina	3500 / 4775	90,1 / 73,2	55,02	208
Champion 5500 Dual Fuel	Gasolina	5500 / 6900	93,8 / 87,2	73,48	389
	GLP	5000 / 6250	93,4 / 86,2		
GeneracGP 6500 CO sense	Gasolina	6500 / 8125	94,2 / 83,3	78,02	389

Fonte: Adaptado de *Popular Mechanics* (2021).

O modelo Honda EU2200i *companion* trata-se de um moto-gerador portátil do tipo *inverter* e silenciado, ou seja, possui um invólucro acústico que reduz sensivelmente o ruído de operação. O equipamento Briggs & Stratton 3500 *Watt Portable* possui um recurso de desligamento automático no caso da concentração de monóxido de carbono (CO) ao redor do moto-gerador ser elevada, isso representa mais segurança a saúde dos usuários. O moto-gerador Champion 5500 *Dual Fuel* pode operar tanto com gasolina quanto com GLP. Com os diferentes combustíveis ocorrem diferenças, tanto na potência quanto no ruído. O moto-gerador GeneracGP 6500 CO *sense* é o mais potente dos equipamentos avaliados e, assim como o Briggs & Stratton, também conta com sensor de concentração de CO com desligamento automático do moto-gerador no caso de alta concentração do gás tóxico (POPULAR MECHANICS, 2021).

2.4 ENERGIA ELÉTRICA EM RVs

Quando estacionado, um trailer deve preferencialmente ser conectado a uma fonte externa de energia. Entretanto, existem situações em que isso não é possível, como por exemplo em uma parada para pernoite em um posto de combustíveis que não fornece energia elétrica. Por esse motivo, os trailers possuem uma ou mais baterias estacionárias que dão autonomia de energia ao veículo por um determinado período (ATAULO, 2016).

2.4.1 Baterias estacionárias

As baterias estacionárias apresentam construção física muito semelhante às baterias automotivas, porém, operam de maneira diferente. Elas são indicadas para diversas aplicações, mas, a sua maior utilidade é em sistemas que exigem uma maior profundidade de descarga, como *no break* e sistemas de energia solar não conectados à rede (*off grid*). As baterias estacionárias foram projetadas para ciclos de descarga profundos e com o objetivo de oferecer uma quantidade constante de corrente por um longo período de utilização. Também podem ser descarregadas completamente diversas vezes. Suas placas de chumbo são mais espessas e suportam quantidades maiores de ciclos de carga e descarga, atendendo assim às demandas por esse tipo de uso com maior vida útil (MOURA, 2021).

A Figura 5 mostra um banco com duas baterias estacionárias de 12 V CC, cada uma com capacidade nominal de 150 Ah. Como estão conectadas em paralelo, o sistema totaliza 300 Ah de capacidade, na tensão de 12 V CC. Este banco de baterias está instalado em um trailer Apolo Gold 52 de fabricação nacional, que acomoda até 5 pessoas.

Figura 5 – Banco com duas baterias estacionárias instalado em um trailer



Fonte: Elaborado pelo Autor.

2.4.2 Inversores, conversores e carregadores

Em RVs ou embarcações, além de outras aplicações onde são empregados bancos de baterias para acumular energia elétrica, é necessária a instalação de equipamentos que condicionem a energia para o uso e mantenham sempre carregadas as baterias. Estes equipamentos são: o conversor, o carregador de baterias e o inversor (TECHNOMASTER, 2021). As características desses equipamentos são as seguintes:

- conversor, geralmente é automático e recebe energia da rede em 127 V CA ou 220 V CA, e entrega à central elétrica do RV numa forma estabilizada e na tensão adequada. O conversor garante o fornecimento de energia estabilizada, independente se a rede de entrada for 127 V CA ou 220 V CA;
- carregador de baterias, o qual converte a energia de CA em CC, de forma estabilizada e filtrada, possibilitando recarga do banco de baterias quando o RV está conectado a uma fonte externa de energia;
- inversor, cuja função é converter energia elétrica CC, fornecida pelo banco de baterias, em energia elétrica de 127 V CA ou 220 V CA.

Existem equipamentos que realizam as três funções, sendo carregador, inversor e conversor, como o caso do equipamento multifunção Technomaster TM41 2500, mostrado na Figura 6, que tem inversor com potência de 1500 W e transformador de 2500 W.

Figura 6 – Inversor multifunção Technomaster TM 41 2500



Fonte: Technomaster (2021)

Outro inversor multifunção disponível no mercado brasileiro e utilizado nos trailers e *motorhomes* da Apollo Trailer é o equipamento da GW Energy (GW 2000 TCI) que possui carregador de baterias de 40 A, transformador de 2500 W e inversor de 2000 W.

2.4.3 Sistemas fotovoltaicos para RVs

Independentemente do local que os usuários escolherem acampar com seu veículo recreativo, precisarão de uma fonte de energia para alimentar o equipamento. As principais opções são conexão com uma tomada CA, um moto-gerador a combustão ou energia solar fotovoltaica. A instalação de um sistema fotovoltaico em um RV é relativamente simples e permite que o veículo permaneça sem conexão externa de energia (BLUE, 2020).

É errado pensar que um sistema de energia fotovoltaica atende diretamente as necessidades de energia de um RV, quando na realidade, o sistema fotovoltaico serve para recarregar as baterias do veículo, se ele não está conectado a uma fonte externa ou um moto-gerador de energia. Um sistema fotovoltaico apresenta as vantagens de não consumir combustível, nem emitir ruído, além de operar continuamente sem qualquer necessidade de supervisão, desde que haja incidência solar nos módulos fotovoltaicos. Em dias nublados, a noite ou em qualquer outra situação que não haja incidência solar, será necessário utilizar uma fonte externa CA, ou um moto-gerador portátil, ou o alternador do veículo, quando este estiver com o motor operando (PURSEL, 2020).

Um sistema fotovoltaico para RV se assemelha a um sistema residencial, e é composto basicamente por módulos fotovoltaicos que tem a função de captar energia solar e converter em energia elétrica, controlador de carga que controla os regimes de recarga das baterias, as quais servem para armazenar a energia e um inversor, que converte a energia elétrica CC para CA. Além desses elementos básicos, também fazem parte do sistema fios e cabos para conexão dos componentes, bem como dispositivos de montagem e fixação das peças (ENERGYSAVE, 2020).

Para utilizar um RV em um local sem conexões elétricas externas, alguns dos componentes essenciais funcionarão, mas outros não. Isso ocorre porque certos aparelhos e dispositivos operam com um tipo de energia que as baterias do RV não podem fornecer diretamente. O sistema elétrico de um RV é dividido em dois circuitos distintos, sendo um CC de baixa tensão e geralmente 12 V CC, e outro sistema em 127 V CA ou 220 V CA. O sistema 12 V CC alimenta componentes básicos de RV, como luzes, tomadas USB, rádio, ventiladores, bomba d'água, aquecedor de água e alguns tipos específicos de refrigeradores. O sistema 127 V CA ou 220 V CA é utilizado para dispositivos de grande consumo de energia, como TVs, DVD players, computadores, fornos de micro-ondas, condicionadores de ar e outros aparelhos domésticos (cafeteiras, torradeiras e secadores de cabelo). Todos os equipamentos CC operam usando apenas as baterias do RV, mas os dispositivos CA requerem uma fonte de energia

externa, ou um inversor para transformar a energia de 12 V CC em energia de 127 V CA ou 220 V CA (BLUE, 2020).

2.5 CLIMATIZAÇÃO DE RVS

Os sistemas de climatização de trailers podem variar de fabricante para fabricante e são influenciados pela região à que se destina a utilização do veículo. A fabricante americana Winnebago utiliza, em todos os modelos disponíveis na linha Microminie, dois equipamentos distintos para climatização, sendo um ar-condicionado de teto de ciclo frio, com potência de refrigeração de 3,96 kW (13500 BTU/h) e um aquecedor a gás GLP de 5,28 kW (18000 BTU/h). Os dispositivos são próprios para utilização em veículos (ITU TRAILERS IMPORTS, 2021).

O fabricante nacional Turiscar, com planta fabril localizada no estado do Rio Grande do Sul, utiliza em seus trailers aparelhos de ar-condicionado *split*, de ciclos quente e frio, com dutos que distribuem o ar em todos os ambientes do veículo (TURISCAR, 2016).

A Apolo Trailer, empresa brasileira do estado de Santa Catarina, utiliza aparelhos de ar-condicionado *split* com ciclos quente e frio (Figura 7). Em todos os modelos de trailers disponibilizados pela empresa, a potência nominal dos climatizadores é de 2,64 kW (9000 BTU/h) (APOLO TRAILER, 2021).

Figura 7 – Trailer Apolo com ar condicionado *split*



Fonte: Apolo Trailer (2021).

2.5.1 Sistemas de aquecimento para RVs

Quando o aparelho de ar-condicionado do RV não tem a função de ciclo quente, existe a opção de se utilizar um aquecedor a GLP, a diesel ou elétrico. Os aquecedores a GLP permitem a sua utilização em locais onde não há possibilidade de conexão externa de energia. Não são muito confiáveis a altitudes maiores que 2000 m. Já os aquecedores elétricos dispensam a preocupação com o GLP e podem funcionar em altitudes mais elevadas, entretanto, para o seu funcionamento, o RV necessita de uma conexão externa de energia, com potência nominal suficiente para alimentar o equipamento sem risco de sobrecargas (FALIN, 2020).

Um aquecedor a GLP funciona com fluxo de ar forçado que passa pelo exterior de uma câmara de combustão operando como um trocador de calor. Dentro desta câmara de combustão ocorre a queima de GLP. O fluxo de ar quente também pode passar pela tubulação de água do veículo evitando o congelamento em situações de frio extremo. O sistema é composto basicamente por termostato, câmara de combustão, ventilador, placa de controle, ignitor, interruptor de segurança, tubulações e aberturas de admissão e exaustão (FLANAGAN, 2019). Na Figura 8 é mostrada a imagem de um aquecedor a GLP Propex HS2000 com potência de aquecimento nominal de 1,9 kW.

Figura 8 – Aquecedor Propex HS2000



Fonte: Propex (2021).

Existem também os aquecedores a diesel, e segundo a publicação da Mowgli Adventures (2021) esses aquecedores são mais adequados para *motorhomes*. A justificativa para tal preferência é o fato de poder utilizar o combustível do próprio veículo para o funcionamento, já que a maioria dos *motorhomes* utilizam diesel como combustível, dispensando assim a necessidade de um reservatório exclusivo e de abastecimentos adicionais. O funcionamento do aquecedor é relativamente simples, o equipamento possui uma câmara de combustão, um ventilador e uma bomba de combustível. Dentro da câmara existe um ignitor que inicia a combustão do diesel. O exterior da câmara de combustão é aletado e funciona como um trocador de calor. Com a combustão, ocorre o aquecimento de toda a superfície aletada,

onde há circulação de ar motivada pelo ventilador. O ar exterior entra no dispositivo, aquecendo-se e então é enviado para o interior do veículo. A Figura 9 mostra um aquecedor a diesel Webasto com potência de aquecimento nominal de 2 kW.

Figura 9 – Aquecedor a diesel Webasto Air Top 2000 STC



Fonte: Adaptado de Webasto (2021).

A Mowgli Adventures (2021) avaliou os dados teóricos dos aquecedores de ambiente a diesel destinados a trailers e *motorhomes*. Na publicação evidenciam dois principais fabricantes, sendo eles Webasto e Espar, além de citar equipamentos menos conhecidos, ou até mesmo sem marca, de fabricantes chineses e russos. Foi relatado como característica deste tipo de equipamento o alto nível de emissão de ruído, embora o parâmetro não tenha sido quantificado. Fatores como potência, consumo elétrico e consumo de combustível aparecem na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados comparativos de aquecedores a diesel

Produto	Potência de aquecimento (kW)	Consumo elétrico (W)	Consumo de combustível (L/h)
Webasto STC 2000	0,9 a 2,0	13 a 30	0,12 a 0,24
Webasto Air Top Evo 40	1,5 a 4,0	15 a 55	0,18 a 0,49
Espar Airtronic D2	0,85 a 2,2	8 a 34	0,10 a 0,28
Espar Airtronic S2	1,5 a 4,0	6 a 42	0,11 a 0,51

Fonte: Adaptado de Mowgli Adventures (2021).

2.6 SISTEMAS COMBINADOS DE CALOR E ENERGIA

O termo CHP é uma sigla geral que pode ser referida de outras formas, dependendo da aplicação. Outras nomenclaturas para a tecnologia, seguidos de suas siglas, são: *Building Cooling, Heating, and Power* (BCHP); *Cooling, Heating, and Power for Buildings* (CHPB); *Combined Cooling, Heating, and Power* (CCHP); *Integrated Energy Systems* (IES); e, ainda, *Distributed Energy Resources* (DER) (OLAND, 2004).

Os sistemas de cogeração que combinam geração de calor e eletricidade operam com maior eficiência do que sistemas que geram calor e eletricidade de forma independente. A energia térmica recuperada do combustível usado em motores de combustão interna (MCI), turbinas a vapor (ST), turbinas a gás (GT), motores Stirling (SE) ou células combustíveis (FC) pode ser utilizada em diferentes necessidades residenciais, comerciais ou industriais (ASHRAE, 2016).

Em sistemas CHP, com geração de eletricidade por meio da queima de combustíveis, a recuperação pode ser realizada a partir do calor residual da água de resfriamento e dos gases de exaustão. Esta energia térmica pode então ser utilizada para aquecimento de ambientes, aquecimento de água doméstica e para acionar *chillers* de absorção para aplicações de resfriamento. (ONOVWIONA e UGURSAL, 2006).

A literatura apresenta divergências na definição de um valor absoluto para o limite de potência de sistemas micro CHP. A diretiva da União Europeia sobre a promoção da cogeração (2004) estabelece que são consideradas unidades micro CHP os equipamentos de até 50 kW de potência elétrica. Já, Simader, Krawinkler e Trnka (2006) e Dentice D'Accadia, *et al.* (2003) consideram a potência máxima de saída elétrica em 15 kW para caracterizar sistemas micro CHP.

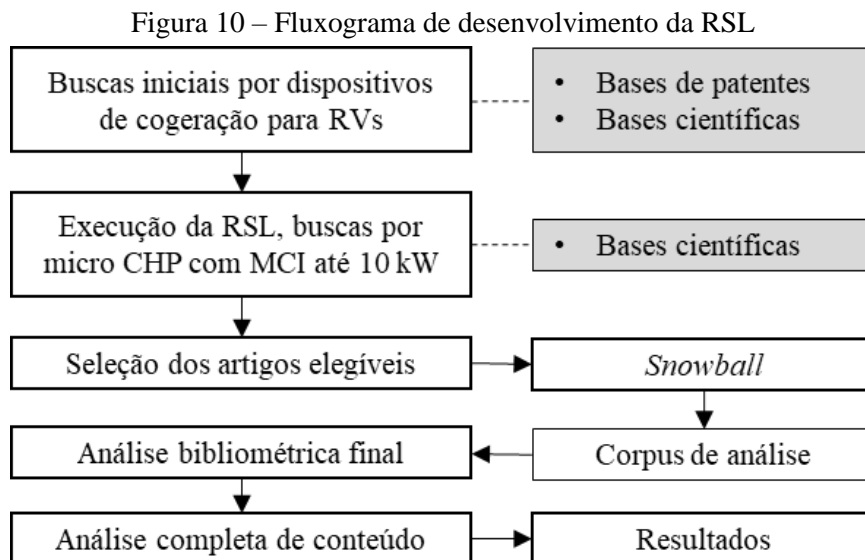
Em alguns países, principalmente de clima frio, a busca pela economia de energia promoveu o amplo desenvolvimento da tecnologia CHP. A viabilidade econômica desta tecnologia é determinada pela diferença entre as tarifas de gás e eletricidade e pela relação entre as demandas de eletricidade e aquecimento para o projeto. Nos sistemas residenciais de aquecimento, ventilação e ar-condicionado, o calor residual dos moto-geradores pode ser aproveitado, tanto para aquecimento, quanto para, eventualmente, acionar um turbocompressor (ASHRAE, 2016).

O Relatório Final do Anexo 42 da Agência Internacional de Energia, Conservação de Energia em Edifícios e Programa de Sistemas Comunitários do governo do Canadá (2008), descreve um modelo para avaliação de desempenho de sistemas micro CHP a combustão. O modelo é aplicável a MCI e SE. Os parâmetros a serem mensurados para as avaliações compreendem a vazão mássica de combustível (\dot{m}_f), a vazão mássica de água de resfriamento (\dot{m}_w), as temperaturas de entrada (T_{w1}) e saída (T_{w4}) da água de resfriamento e a saída de potência elétrica líquida do dispositivo (P_{el}). Com essas variáveis é possível determinar a potência de entrada, a potência de saída elétrica, a potência de saída térmica, a eficiência elétrica e eficiência de recuperação térmica. O modelo traz simplicidade nas avaliações de sistemas micro CHP.

3 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A condução de pesquisas científicas, principalmente nos casos em que as pesquisas são realizadas no intuito de produzir com rigor científico efetivo, possui como etapa fundamental a RSL. O produto da investigação científica a partir da RSL tem por objetivo desenvolver teorias, estabelecer evidências e resolver problemas. Sendo assim, é importante que sejam fornecidas informações do que foi pesquisado, bem como da maneira como foram realizadas as pesquisas e quais os resultados encontrados. (DRESCH, LACERDA e ANTUNES JÚNIOR, 2015).

Neste trabalho, antes da execução da RSL, foram realizadas pesquisas gerais na *web* utilizando termos genéricos com o objetivo de identificar se existem dispositivos combinados de calor e energia elétrica para RVs. As buscas foram trabalhos sobre dispositivos micro CHP para RVs bem como registros de sistemas combinados de calor e energia para RVs, tanto nas bases de dados científicos *Scopus* e *Web of Science*, quanto nos bancos de registro de propriedade intelectual do Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), na Base de Patentes da América Latina e Espanha (LATPAT) no Escritório Europeu de Patentes (EPO) e na Organização Mundial da Propriedade Intelectual (WIPO). Algumas publicações são citadas nos Itens 1.1 e 1.2. A Figura 10 ilustra o fluxograma de desenvolvimento da RSL e o Protocolo Prisma consta no APÊNDICE F – PROTOCOLO PRISMA DA RSL



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 PLANEJAMENTO DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Para definir as questões de interesse da RSL foi utilizada a ferramenta PICOC (população, intervenção, comparação, *outcomes* e contexto). Esta ferramenta foi utilizada primeiramente na área da saúde por Petticrew e Roberts (2006) e adaptado à área de engenharia de software por Kitchenham e Charters (2007). Conforme Ermel (2020) a ferramenta pode ser adaptada a qualquer área do conhecimento. O detalhamento da ferramenta PICOC específico para este artigo aparece no Quadro 1.

Quadro 1 – Definição do PICOC

P	População	Publicações de dispositivos micro CHP com potencial para adaptação em RVs Sistemas micro CHP com MCI para RVs ou sistemas micro CHP com MCI adaptáveis a RVs
I	Intervenção	Investigar a possibilidade de utilizar sistemas micro CHP com MCI em RVs
C	Comparação	Comparação das características técnicas dos equipamentos identificados na pesquisa
O	Resultados (<i>outcomes</i>)	Viabilidade técnica para aplicação ou adaptação em RVs
C	Contexto	Limitar as publicações a trabalhos científicos com dados experimentais de equipamentos micro CHP que utilizam MCI como máquina primária, ensaiados ou com dados de desempenho disponíveis e com características semelhantes ao que se necessita para utilização em RVs.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1 Definição das estratégias de busca

Para realizar a revisão sistemática da literatura, foi definida a questão de pesquisa, a qual se deseja responder com este trabalho:

“A partir do atual desenvolvimento da tecnologia micro CHP com MCI, quais os parâmetros de desempenho dos equipamentos cujas características se assemelham ao que seria necessário para RVs?”

O objetivo desta questão é a busca de embasamento teórico relativo aos sistemas combinados de calor e energia elétrica que utilizam como máquina primária um MCI, e a avaliação dos parâmetros de desempenho destes dispositivos, verificando a compatibilidade de utilização da tecnologia em RVs.

Para execução da RSL as buscas foram realizadas em bases de dados científicos *Scopus* e *Web of Science*, com o objetivo de identificar dispositivos específicos ou adaptáveis à RVs. A partir das buscas iniciais citadas no Item 3, foi possível identificar a combinação de palavras que melhor atenda o PICOC e a questão de pesquisa especificada. Os termos de pesquisa deste trabalho são: *"micro generation"*, *"micro combined heat and power"*, *"micro CHP"*, *"internal combustion engine"* e *"reciprocating engine"*.

3.1.2 Critérios de exclusão e inclusão

Para execução de uma RSL devem ser apresentados os critérios de busca, exclusão, inclusão e avaliação das publicações disponíveis relacionadas ao tema. Segundo Moher *et al.*, (2015) o objetivo de uma RSL é responder a uma ou mais perguntas formuladas de forma clara, utilizando métodos sistemáticos e explícitos para identificar, selecionar e avaliar as pesquisas relevantes, coletando dados desses estudos que são analisados e incluídos na revisão.

As principais grandezas definidas no Relatório Final do Anexo 42 da Agência Internacional de Energia, Conservação de Energia em Edifícios e Programa de Sistemas Comunitários do governo do Canadá (2008), vistas no Item 2.6, foram utilizadas para identificar os equipamentos aplicáveis ou adaptáveis a RVs.

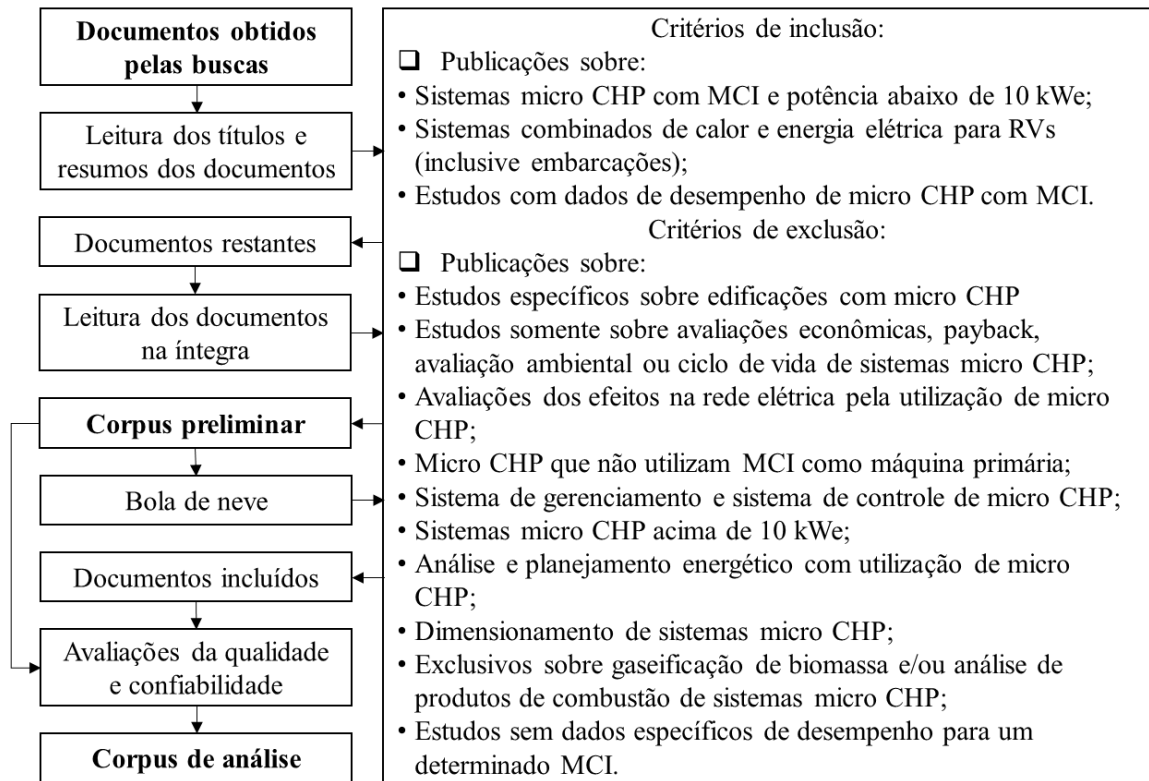
A demanda de energia térmica para um RV típico pode variar bastante de acordo com as necessidades específicas de cada usuário. Para estimar esta demanda foi considerado o fato de que no mercado brasileiro os dispositivos de aquecimento de água mais utilizados em trailers (Apolo (2021), Coyote (2021) e Easy Transport (2022)) são os aquecedores de passagem a GLP com capacidade nominal de vazão de 7 L/min e potência térmica em torno de 10 kW, Lorenzetti (2021).

Quanto a climatização no modo aquecimento, pode-se fazer a mesma analogia e estimar a necessidade de energia de acordo com a potência de aquecimento dos atuais aparelhos de ar-condicionado *split* de 9000 BTU/h, em torno de 2,6 kW, já que são os mais utilizados em RVs brasileiros (Item 2.5). Além disso, os aquecedores a GLP e a diesel estão disponíveis na potência de 2 kW, (Item 2.5.1)

Para a demanda de energia elétrica pode se considerar a potência de 1500 W a 2000 W, equivalente aos dispositivos vistos no Item 2.4.2, disponíveis em RVs do mercado brasileiro.

A partir destas estimativas conclui-se que um sistema micro CHP de pequeno porte seria suficiente para atender tais demandas. Com isso, foi definido como um dos critérios de exclusão o limite de 10 kW de potência elétrica. A Figura 11 mostra o fluxograma da elegibilidade para os documentos.

Figura 11 – Fluxograma de elegibilidade dos documentos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliar os dispositivos identificados nos artigos foram compilados os dados publicados, tanto aqueles encontrados via experimentos e simulações, quanto os dados dos fabricantes dos equipamentos citados pelos autores.

3.2 EXECUÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Para execução da RSL, as pesquisas foram realizadas no dia 24 de novembro de 2023. Os termos foram buscados nos títulos, resumos e palavras-chave. Os resultados foram restringidos a apenas publicações em inglês, apenas trabalhos publicados a partir do ano de 2001 e apenas artigos de revistas ou documentos de conferência. O período foi estabelecido a partir de 2001, tendo em vista que antes disso pouco se discutia sobre micro CHP no meio científico. A *string* de busca juntamente com os resultados para cada base de dados consta no Quadro 2.

Quadro 2 – Resultados da busca nas bases de dados

String de buscas	Bases de dados	Resultados
("Micro Generation " OR "Micro combined heat and power" OR "micro CHP") AND ("internal combustion engine" OR "ICE" OR "reciprocating engine")	Scopus	100
	Web of Science	66

Fonte: Elaborado pelo autor.

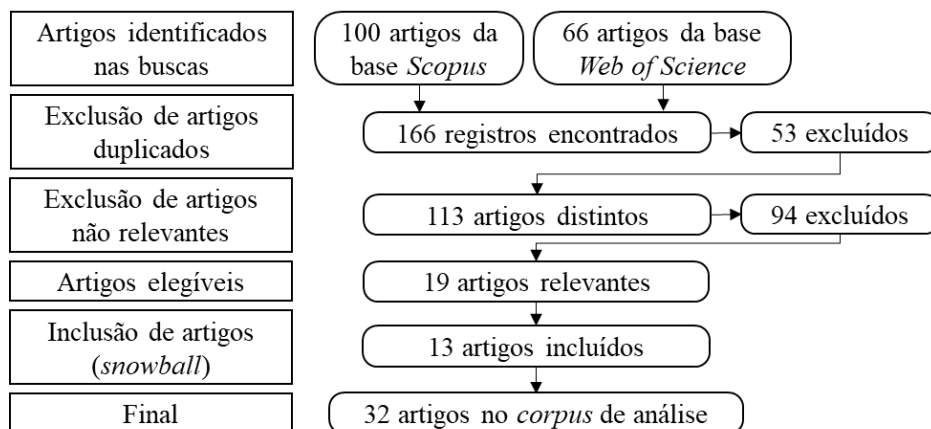
As consultas nas bases de dados retornaram um total de 166 artigos, sendo que alguns desses artigos constam nas duas bases de dados. Com isso, 53 registros duplicados foram excluídos, restando 113 documentos.

3.3 SELEÇÃO DOS DOCUMENTOS ELEGÍVEIS PARA A PESQUISA

A seleção dos documentos elegíveis para a pesquisa foi realizada a partir da aplicação dos critérios de inclusão e exclusão (definidos na Figura 11) aos resultados obtidos pelas buscas nas bases de dados.

Após avaliação de elegibilidade realizada nos 113 registros distintos encontrados nas buscas, 94 foram considerados não elegíveis por não atenderem os critérios de inclusão, ou estarem enquadrados em algum dos critérios de exclusão, restando 19 artigos para a análise completa. A Figura 12 ilustra os passos para seleção dos documentos até a composição final do *corpus* de análise.

Figura 12 – Seleção dos documentos elegíveis para a análise completa



Fonte: Elaborado pelo autor

Nos 19 documentos que restaram, foi aplicada a técnica da bola de neve, onde são identificados outros artigos elegíveis nas suas listas de referência, com o procedimento foram encontrados mais 13 artigos. No total, 32 documentos foram considerados elegíveis para análise completa.

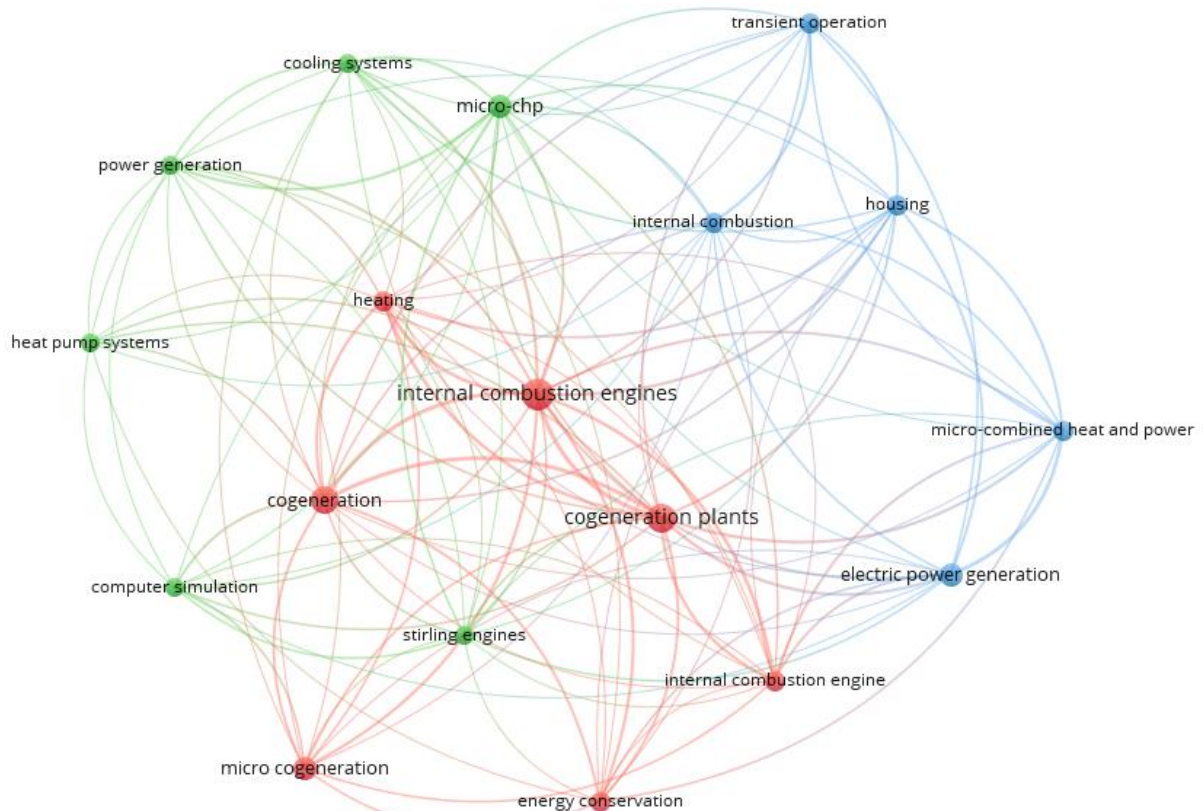
3.4 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Para realização da análise bibliométrica foram utilizados os *softwares* Microsoft Excel e *VOSviewer*, além das ferramentas de análise disponíveis na base de dados *Scopus*.

3.4.1 Principais palavras-chave

As palavras-chave, com no mínimo 7 ocorrências, são apresentadas graficamente na Figura 13. Além das palavras-chave dos autores, também foram consideradas as palavras-chave indexadas. As seis palavras-chave que mais aparecem nos artigos são: *internal combustion engine* (15 ocorrências), *cogeneration plants* (11 ocorrências), *cogeneration* (10 ocorrências), *electric power generation* (7 ocorrências), *micro-chp* (7 ocorrências) e *micro cogeneration* (7 ocorrências).

Figura 13 – Ocorrência das palavras-chave

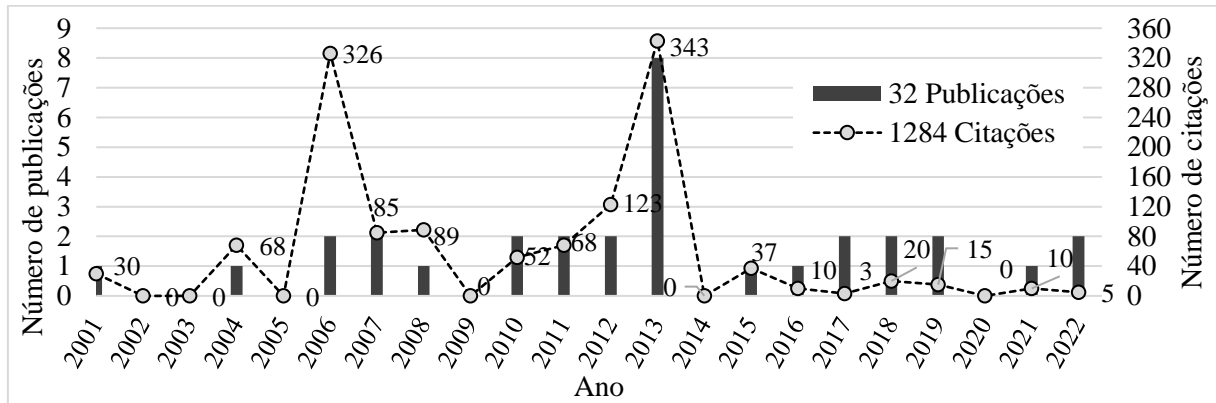


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.2 Evolução das pesquisas ao longo dos anos

A análise da evolução da pesquisa ao longo dos anos é mostrada no gráfico da Figura 14 ilustra esses dados no período de 2001 a 2022.

Figura 14 – Pesquisas sobre o tema dos artigos do *corpus* de análise



Fonte: Adaptado de Scopus (2023).

O pico no número de publicações foi no ano de 2013, quando foram publicados 8 artigos que somaram 343 citações. Porém, um dos artigos publicados em 2006 foi o mais citado, elevando significativamente o número total de citações deste ano. A média geral foi de 1,45 publicações por ano, já a média de citações por ano foi de 58,46 e o total de citações foi de 1284.

3.4.3 Produtividade e influência dos autores

Na Tabela 5 aparecem ordenados os 7 autores mais produtivos na área. O autor mais produtivo é Sibilio, S. com 9 publicações em segundo aparece Rosato, A. com 6 publicações. Ambos da instituição italiana *Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli*.

Tabela 5 – Produtividade dos autores

Classificação	Autor	Publicações	Citações
1º	Sibilio, S.	9	431
2º	Rosato, A.	6	289
3º	Roselli, C.	5	200
3º	Sasso, M.	5	200
5º	Ulloa, C.	4	86
6º	Ippolito, F.	4	12
6º	Venturini, M.	4	12

Fonte: Adaptado de Scopus (2023).

Quanto à classificação dos autores mais influentes, Tabela 6, o critério de ordenação é o número de citações. Novamente, Sibilio, S. e Rosato, A. aparecem na primeira e segunda posição, respectivamente, sendo o primeiro com 431 e o segundo com 289 citações. Empatados na 3ª colocação estão D' Herdt, P., De Paepe, M. e Mertens, D., todos da Bélgica. Os três autores publicaram, apenas um dos 32 artigos elegíveis, porém, a publicação já possui 271 citações.

Tabela 6 – Influência dos autores

Classificação	Autor	Citações	Publicações
1º	Sibilio, S.	431	9
2º	Rosato, A.	289	6
3º	D' Herdt, P.	271	1
3º	De Paepe, M.	271	1
3º	Mertens, D.	271	1
6º	Roselli, C.	200	5
6º	Sasso, M.	200	5

Fonte: Adaptado de Scopus (2023).

Na Figura 15 aparecem as redes de colaboração entre 10 autores listados na Tabela 5 e Tabela 6. As linhas representam as conexões entre eles e os círculos representam a quantidade de publicações de cada autor, quanto maior o círculo, maior o número de publicações. A maior rede de colaboração está representada em vermelho e contém os 4 autores mais produtivos.

Figura 15 – Redes de colaboração entre os autores

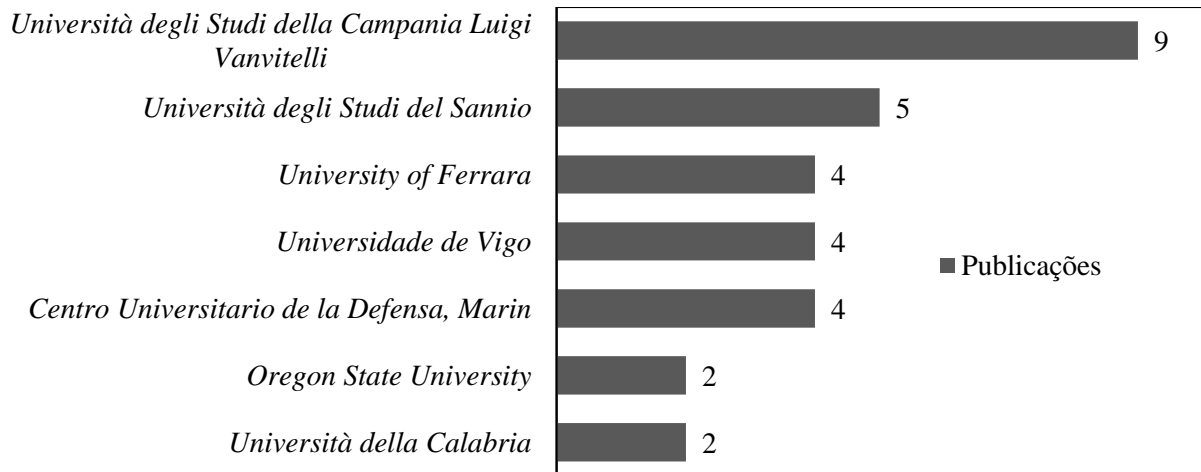


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.4 Principais instituições

Na Figura 16 constam as instituições com no mínimo duas publicações no *corpus* de análise. Nove artigos foram publicados por pesquisadores da *Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli*. As três primeiras instituições são italianas, já a quarta e quinta são espanholas.

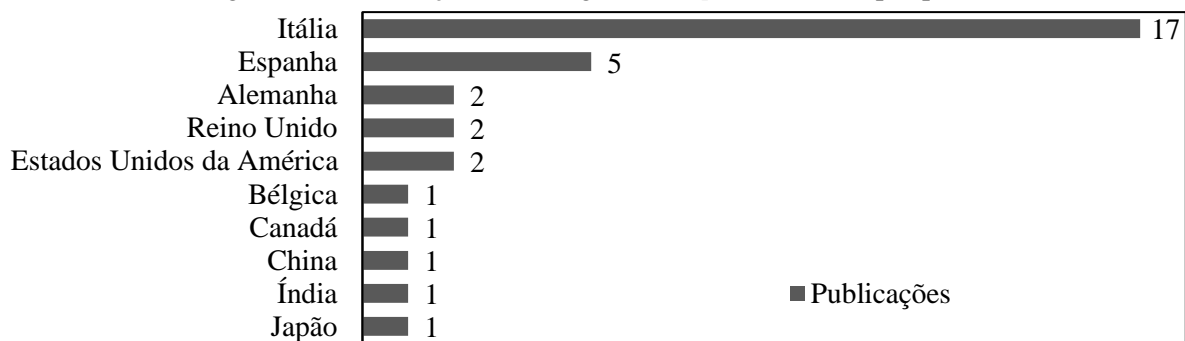
Figura 16 – Principais instituições de pesquisa



Fonte: Adaptado de Scopus (2023).

3.4.5 Países com publicações no *corpus* de análise

Itália aparece como líder em publicações, pois, como pode ser visto na Figura 17, o país tem 17 dos 32 artigos elegíveis. Depois, com 5 artigos, consta a Espanha.

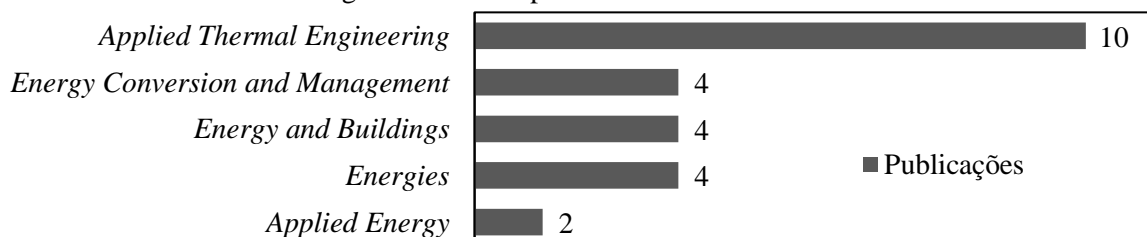
Figura 17 – Publicações dos artigos do *corpus* de análise por países

Fonte: Adaptado de Scopus (2023).

3.4.6 Revistas científicas com maior número de publicações

Na Figura 18 são listadas as revistas científicas com maior número de publicações referente a lista dos 32 artigos do *corpus* de análise.

Figura 18 – Principais revistas científicas



Fonte: Adaptado de Scopus (2023).

Desponta, com 10 artigos, a *Applied Thermal Engineering*, em seguida, com 4 publicações estão empatadas a *Energy Conversion and Management*, *Energy and Buildings* e *Energies*.

3.4.7 Artigos mais influentes

Na Tabela 7 são mostrados os dados das cinco publicações com maior número de citações, dentro da lista dos 32 artigos do *corpus* de análise. O artigo *Micro-CHP systems for residential applications*, dos autores De Paepe, M., D'Herdt, P., Mertens, D., é o mais influente e tem 271 citações. Na segunda posição, o artigo *Performance analysis of an integrated CHP system with thermal and Electric Energy Storage for residential application* é assinado por três autores italianos, Bianchi, M., De Pascale, A., Melino, F., que não aparecem na lista de autores mais produtivos (Tabela 5) bem como na lista de autores mais influentes (Tabela 6). Três dos cinco artigos mais influentes foram publicados pela *Applied Thermal Engineering*.

Tabela 7 – Artigos mais influentes

Classificação	Título do artigo	Autores	Ano	Revista	Citações
1º	<i>Micro-CHP systems for residential applications</i>	De Paepe, M. D'Herdt, P. Mertens, D.	2006	<i>Energy Conversion and Management</i>	271
2º	<i>Performance analysis of an integrated CHP system with thermal and Electric Energy Storage for residential application</i>	Bianchi, M. De Pascale, A. Melino, F.	2013	<i>Applied Energy</i>	112
3º	<i>Benchmark testing of Micro-CHP units</i>	Thomas, B.	2008	<i>Applied Thermal Engineering</i>	89
4º	<i>Energy, environmental and economic dynamic performance assessment of different micro-cogeneration systems in a residential application</i>	Rosato, A. Sibilio, S. Ciampi, G.	2013	<i>Applied Thermal Engineering</i>	71
4º	<i>Feasibility of a new domestic CHP trigeneration with heat pump: I. Design and development</i>	Míguez, J.L. Murillo, S. Porteiro, J. López, L.M.	2004	<i>Applied Thermal Engineering</i>	68

Fonte: Adaptado de Scopus (2023).

3.5 RESULTADOS DA RSL

Nesta seção é feita a análise dos 32 artigos do *corpus* de análise. São descritas as características específicas dos sistemas micro CHP, como potência do motor (P_{mec}), potência

de recuperação térmica total ($P_{hr,tot}$) e potência elétrica (P_{el}); bem como a eficiência de recuperação térmica total ($\eta_{hr,tot}$), eficiência elétrica (η_{el}) e a eficiência global chamada de fator de utilização (FU). As informações sobre os tipos de sistemas de arrefecimento e recuperação de calor, tipos de motores e combustíveis também foram relatadas. Nos artigos em que não foram feitas análises experimentais, mas com análise teórica ou simulação numérica, foram computados os dados dos supostos equipamentos avaliados.

3.5.1 Análise dos artigos elegíveis a partir das buscas

Os 19 documentos, considerados elegíveis para análise completa, são discutidos seguindo a ordem cronológica de publicação, iniciando por Possidente, *et al.* (2006), que realizaram a comparação entre três sistemas micro CHP equipados com MCI. Um dos equipamentos, o micro CHP C-3, já estava em fase comercial no Japão. Este dispositivo entrega potência elétrica máxima de 6 kW, utiliza arrefecimento líquido com componentes de alto nível tecnológico e foi inteiramente desenvolvido para finalidade de cogeração. Os outros dois equipamentos, micro CHP E-1 e micro CHP E-2, foram concebidos pelo grupo de pesquisa, a partir de moto-geradores convencionais a gasolina. Os motores desses equipamentos foram convertidos para operação com gás natural (GN). O arrefecimento destes dois dispositivos é a ar, sendo que um deles, o micro CHP E-2, com P_{el} de 1,67 kW, recupera apenas a energia dos gases de exaustão para cogeração e o outro, o micro CHP E-1, com P_{el} de 3 kW, recupera também a energia térmica do ar de arrefecimento do motor e do gerador. A Tabela 8 mostra os dados dos dispositivos avaliados. Nota-se que o dispositivo comercial, micro CHP 3 apresenta valores significativamente mais elevados nos parâmetros de desempenho, a citar a η_{el} de 26,5%, frente aos valores de 16,4% e 16,3%, respectivamente para o Micro E-1 e micro CHP E-2.

Tabela 8 – Principais dados dos equipamentos avaliados por Possidente, *et al.* (2006)

Equipamento	V_{dest} (cm ³)	N° cil (-)	P_f (kW)	P_{el} (kW)	$P_{hr,tot}$ (kW)	η_{el} (%)	$\eta_{hr,tot}$ (%)	FU (%)
Micro CHP E-1	359	1	18,3	3,00	10,5	16,4	57,4	73,8
Micro CHP E-2	226	1	10,2	1,67	4,0	16,3	38,8	55,1
Micro CHP C-3	952	3	22,7	6,00	13,5	26,5	59,5	86

Fonte: Adaptado de Possidente, *et al.* (2006).

Sibilio, *et al.* (2007) apresentam um artigo sobre aplicação residencial de sistemas micro CHP com P_{el} abaixo de 15 kW. No trabalho são encontradas informações sobre sistemas comercialmente disponíveis na época da publicação. A Tabela 9 mostra algumas informações

sobre os dispositivos citados. O Senertech Dachs HKA H 5,3 opera com biodiesel, todos os outros operam com GN, e alguns ainda aceitam GLP ou propano.

Tabela 9 – Sistemas micro CHP até 10 kWe, com MCI listados por Sibilio, *et al.* (2007)

Equipamento	P_f (kW)	P_{el} (kW)	$P_{hr,tot}$ (kW)	η_{el} (%)	$\eta_{hr,tot}$ (%)	FU (%)	Dimensões (mm)	Massa (kg)	V_{dest} (cm ³)	Ruído (dBA)
Honda Ecowill	5,0	1,0	3,2	21,3	65,0	86,3	580x380x880	-	163	-
Home Power VectorCogen HP-3	7,8	3,0	5,3	34,0	43,0	77,0	813x686x457	76	-	68
Ecopower	19,0	4,7	12,5	25,0	65,0	90,0	760x1370x1080	390	270	56
Senertec Dachs HKA G 5,0	19,6	5,0	12,3	26,0	63,0	89,0	720x1060x1000	520	579	56
Home Power VectorCogen HP-5	17,6	5,0	7,3	28,4	41,6	70,0	1041x838x508	156	351	64
Senertec Dachs HKA H 5,3	17,9	5,3	10,4	30,0	59,0	89,0	720x1060x1000	520	579	58
Senertec Dachs HKA G 5,5	20,5	5,5	12,5	27,0	61,0	88,0	720x1060x1000	520	579	56
Aisin Seiki	22,6	6,0	13,5	26,5	59,5	86,0	1100x560x1500	465	-	60
Tedom Micro S8 AP	31,9	8,0	21,0	25,0	65,8	90,8	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Sibilio, *et al.* (2007).

Angrisani, Roselli e Sasso (2010) realizaram uma análise numérica, baseada em condições operacionais de projeto, bem como características nominais dos dispositivos. Os autores utilizaram como base um sistema micro CHP com P_{el} de 6 kW, $P_{hr,tot}$ de 11,7 kW e P_f de 20,8 kW. Considerando as parcelas de autoconsumo, a P_{el} cai para 5,78 kW. A eficiências η_{el} e $\eta_{hr,tot}$ são, respectivamente, 27,8% e 56,2%. No estudo é realizada uma comparação em relação a um sistema de climatização convencional alimentado por energia elétrica e produção de energia térmica em separado, analisando os parâmetros de consumo de energia primária, custos operacionais anuais e as emissões de gases de efeito estufa.

Thiem, Takeishi e Miwa (2011) apresentaram um sistema micro CHP com 1 kW de P_{el} produzido pela Honda, dedicado ao mercado alemão. O equipamento é uma atualização dos já consagrados sistemas micro CHP que a empresa comercializava no Japão. Dentre as alterações, os autores citaram o sistema *EXlink - Extended Expansion Linkage Engine*. Trata-se de um dispositivo que altera o curso do pistão do motor entre os tempos de compressão e expansão. Em resumo, o ponto morto inferior do final do tempo de admissão é um pouco mais elevado do que o ponto morto inferior do final do tempo de expansão. Com o artifício, a eficiência do motor aumenta. Além desta alteração, aprimoramentos nos sistemas de controle, alterações no sistema de armazenamento de energia térmica e consorcio com caldeira suplementar, levaram o sistema micro CHP a atingir 92% de FU .

Entchev, *et al.* (2013) realizaram um estudo de desempenho de um sistema micro CHP híbrido composto por uma caldeira de condensação a GN e um gerador elétrico de 1 kW acionado por um MCI, também alimentado por GN. O equipamento foi avaliado para fornecimento de energia elétrica e energia térmica para uma residência canadense, simulada por uma casa de pesquisa do *Canadian Centre for Housing Technology*. O sistema foi considerado confiável e de bom desempenho, já que, gerou energias elétrica e térmica com alta eficiência durante a estação mais quente e foi capaz de satisfazer a demanda de aquecimento em condições de clima muito frio. O moto-gerador apresentou valores médios de 18,5% para η_{el} , 56,1% para $\eta_{hr,tot}$ e 74,6% para o *FU*.

Rosato, Sibilio e Ciampi (2013) avaliaram a operação de um sistema micro CHP com P_{el} nominal de 6 kW, $P_{hr,tot}$ de 11,7 kW, η_{el} de 28,8% e $\eta_{hr,tot}$ de 56,2%. O sistema é acionado por um MCI com deslocamento de 952 cm³, quatro tempos e três cilindros da AISIN SEIKI. No artigo, o objetivo foi de comparar os ganhos econômicos e ambientais da implantação do sistema em uma edificação multifamiliar italiana, em comparação ao tradicional abastecimento de energia elétrica da rede e GN para aquecimento.

Nos seus resultados, Rosato, Sibilio e Ciampi (2013) mostram que, com a estratégia de acompanhamento de carga térmica, o sistema proporciona uma economia de 6,5% no consumo de eletricidade da rede, redução de 12,2% das emissões de dióxido de carbono equivalente e redução do custo operacional de 20,5%. Para estratégia de seguimento de carga elétrica, as reduções percentuais destes parâmetros são, respectivamente, 5,1%, 10,6% e 31,0%.

Em outro trabalho publicado no mesmo ano, Rosato, Sibilio e Ciampi (2013) compararam três sistemas micro CHP alimentados por GN, sendo dois acionados por MCI e um por SE, os dados de potências e eficiências dos equipamentos constam na Tabela 10. Os sistemas foram integrados a uma residência multifamiliar italiana e o suprimento complementar de energia térmica ficou a cargo de uma caldeira a GN.

Tabela 10 – Dados dos equipamentos avaliados por Rosato, Sibilio e Ciampi (2013)

Equipamento	P_{el} (kW)	$P_{hr,tot}$ (kW)	η_{el} (%)	$\eta_{hr,tot}$ (%)
MCI 1	6	11,7	28,8	56,2
MCI 2	5,5	12,5	27	61
SE	1	6,5	12	90

Fonte: Adaptado de Rosato, Sibilio e Ciampi (2013).

Bianchi, De Pascale e Melino (2013) realizaram um estudo econômico da instalação de um sistema micro CHP em uma residência, considerando as tarifas de energia vigentes na Itália. Deste trabalho, destaca-se a citação dos equipamentos comercialmente disponíveis à época. A

Tabela 11 mostra algumas características destes equipamentos. Nota-se que a tecnologia de FC oferece a melhor relação $P_{el}/P_{hr,tot}$. Porém, quando avaliadas apenas as máquinas térmicas, os MCI apresentam maiores valores dessa relação, em comparação com os microciclos de Rankine (MRC), a microturbina a gás (MGT) e os SE.

Tabela 11 – Equipamentos micro CHP citados por Bianchi, De Pascale e Melino (2013)

Equipamento	Tecnologia	P_{el} (kW)	η_{el} (%)	$\eta_{hr,tot}$ (%)	FU (%)	$(P_{el}/P_{hr,tot})$
Genlec TM Kingston	MRC	1	10	80	90	0,13
Otag LION TM -powerblock	MRC	2	10	84	94	0,12
MTT TM	MGT	2,5	17	64	90	0,26
Ifinia micro CHP	SE	1	13	80	93	0,16
Sunmachine TM	SE	3	20	70	90	0,29
Honda Ecowill TM	MCI	1	20	65	85	0,31
Senertec Dachs TM G5.0	MCI	5	26	63	89	0,41
Senertec Dachs TM G5.0 *condensação	MCI	5	26	74	100	0,35
SFFC HoTbox TM (HT ceramix)	FC	0,45	33	20	52	1,65

Fonte: Adaptado de Bianchi, De Pascale e Melino (2013).

Rey, *et al.* (2015) desenvolveram um sistema micro CHP experimental. Este dispositivo tem acoplado uma bomba de calor e com isso, fornece também refrigeração além de energia elétrica e aquecimento, o que o torna um dispositivo micro CCHP. Os autores argumentam que o dispositivo poderia ser utilizado em situações em que se deseja ou necessita de autonomia de energia, citando aplicações como, casas de campo, embarcações e veículos recreativos. Os pesquisadores testaram o sistema em diferentes modos de operação, avaliando suas potências e eficiências elétrica, de aquecimento e de refrigeração. Em paralelo, foram feitas simulações com software de simulação energética TRNSYS. Para concepção do protótipo experimental foi utilizado um motor Honda GX360 de dois cilindros, ignição por centelha e arrefecimento líquido. O motor opera originalmente a gasolina, mas foi adaptado para operar com butano. Os modos de operação foram determinados pelas combinações das quatro saídas de potência do dispositivo, ou seja, elétrica, térmica do sistema de arrefecimento, térmica dos gases de exaustão e bomba de calor. A saída de potência e elétrica foi mantida sempre ligada e a combinação das demais saídas resultou em oito modos de operação. Como motor foi operado em três diferentes velocidades de rotação (baixa, média e alta, respectivamente 2100 rpm, 2900 rpm e 3500 rpm) o total foi de 24 modos de operação.

Em seus resultados, Rey, *et al.* (2015) relatam que a η_{el} máxima do dispositivo foi de 7,63%, atingida com a bomba de calor desligada e o motor operando em baixa frequência de rotação (2100 rpm). A eficiência de recuperação térmica do circuito de arrefecimento do motor fica em torno de 30% para qualquer modo de operação, exceto quando a bomba de calor esteja

ligada. Nesse caso, o aumento no consumo de combustível causado pela solicitação extra de torque no eixo do motor, causa queda na $\eta_{hr,tot}$.

O mesmo sistema foi avaliado por Rey, et al. (2016), que também testaram três diferentes rotações do motor, listadas na Tabela 12 com suas respectivas potências elétricas e de recuperação térmica. Neste trabalho o dispositivo foi proposto para atender as necessidades de calor e energia elétrica de um veleiro recreativo, onde a demanda de pico estimada foi de 4,35 kW, e indicando a opção pela operação em 2900 rpm. Os autores concluíram que os resultados foram semelhantes entre o SE e o MCI, com ligeira vantagem para o SE que apresentou razão de $P_{el}/P_{hr,tot}$ de 15%, enquanto a mesma relação para o MCI foi de 13%.

Tabela 12 – Resultados obtidos por Rey, et al. (2016)

N (rpm)	P_{el} (kW)	$P_{hr,tot}$ (kW)
2100	0,556	0,2382
2900	0,610	4,747
3500	0,653	5,414

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em dois trabalhos, Ippolito e Venturini (2018) e Ippolito e Venturini (2017) propuseram o modelo para simulação transiente de instalações com micro CHP. Nestes trabalhos os autores avaliaram cinco sistemas micro CHP no atendimento de diversos cenários, onde as supostas instalações são, desde consumidores individuais como apartamentos ou escritórios até consumidores coletivos, como hotéis e conjuntos de quatro apartamentos somados a quatro escritórios.

Em outros dois estudos, Ippolito e Venturini (2017B) e Ippolito e Venturini (2019) os pesquisadores analisaram, via simulação, a operação transiente de um sistema micro CHP com armazenamento térmico e elétrico bem como conexão às redes de fornecimento de energias térmica e elétrica. Na simulação, os autores utilizam um micro CHP com MCI e uma residência caracterizada por um dia típico de verão. A análise foi feita pela avaliação do desvio entre a resposta transitória de cada componente e a demanda da residência caracterizada, no período de um dia. Os autores consideraram a unidade micro CHP Senertec HKA G 5.5, que opera a GN. A residência considerada tem uma demanda de 53,6 kWh/dia de energia elétrica e 4,5 kWh/dia de energia térmica, entretanto, a maior parcela de energia elétrica é utilizada para atender carga térmica de refrigeração.

Foram realizadas análises em diversos cenários considerando operação transiente do sistema. Uma das conclusões deste trabalho é que o desvio relativo entre a demanda e o suprimento de energia a partir do modelo de simulação pode chegar a 6%. Uma ressalva dos

autores é que a simulação foi realizada para um único dia, sendo assim, esse desvio relativo pode representar um valor bastante alto de discrepância entre demanda e suprimento no período de um ano. Na Tabela 13 constam os dados nominais de potências e eficiências dos equipamentos até 10 kW_e avaliados nas pesquisas de Ippolito e Venturini (2017), (2017B), (2018) e (2019).

Tabela 13 – Equipamentos vistos em Ippolito e Venturini (2017), (2017B), (2018) e (2019)

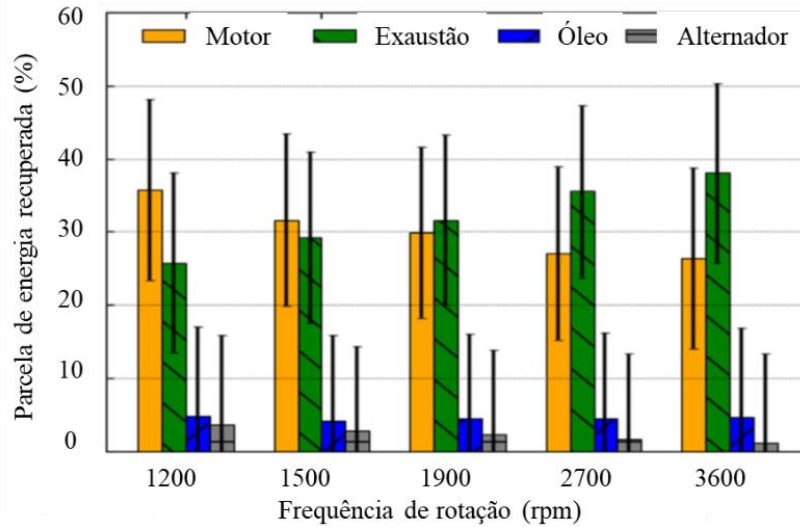
Equipamento	P_{el} (kW)	$P_{hr,tot}$ (kW)	η_{el} (%)	$\eta_{hr,tot}$ (%)
Honda Ecowill	1	3,25	20	65
Senertec HKA G 5.5	5,5	14,7	27	72
Aisin GECC60A2N	6	11,7	28,8	56,2

Fonte: Adaptado de Ippolito e Venturini (2019), (2018), (2017) e (2017B)

Taie, *et al.* (2018) avaliaram o desempenho de um sistema micro CHP Honda ECOWILL. O equipamento foi submetido a ensaios operacionais em três laboratórios diferentes e as análises energéticas e exergéticas foram aplicadas nos dados de operação em regime estacionário. Na análise de primeira lei da termodinâmica, considerando as médias dos três laboratórios, a P_{el} e a $P_{hr,tot}$ foram, respectivamente, 1,18 kW \pm 0,01 kW e 2,55 kW \pm 0,15 kW a η_{el} foi de 23,5% \pm 0,4%, e a $\eta_{hr,tot}$ foi de 51,1% \pm 3,1%. Ao combinar as duas saídas de energia, chegou-se a um FU de 74,5% \pm 5,85%.

De maneira semelhante, Taie e Hagen (2019) avaliaram experimentalmente um sistema micro CHP *Marathon Engine Systems ecopower*. O equipamento foi testado em cinco diferentes regimes de frequência de rotação, 1200, 1500, 1900, 2700 e 3600 rpm. O sistema se mostrou mais eficiente em velocidades mais altas, sendo identificados, a 3600 rpm, os maiores valores de η_{el} de primeira lei e FU , respectivamente 24,4% \pm 0,7% e 94,5% \pm 12,6%. Entretanto, na frequência de rotação mais baixa, 1200 rpm, foi percebido um aumento na energia térmica recuperada, aumentando o FU , mesmo que a η_{el} tenha sido menor. A Figura 19 ilustra graficamente as contribuições individuais das quatro parcelas no total de recuperação térmica do equipamento.

Figura 19 – Parcelas de recuperação térmica do *Marathon Engine Systems ecopower*



Fonte: Adaptado de Taie e Hagen (2019).

Em seu artigo de Taie e Hagen (2019), também relatam ter realizado um teste para avaliar os efeitos da alteração da ordem de recuperação térmica no sistema micro CHP, e identificaram que a baixas rotações a recuperação térmica é maior no arrefecimento do motor. Já com frequência de rotação mais alta, o percentual de recuperação é maior nos gases de exaustão. Na saída do motor os valores de temperatura dos gases de exaustão variaram de 480 °C a 1200 rpm para 680 °C a 3600 rpm.

Perrone, *et al.* (2021) realizaram um estudo 0D (zero D) para avaliar o desempenho de um sistema micro CHP para abastecer instalações residenciais. O equipamento avaliado deve fornecer energia elétrica e calor para atender as demandas domésticas. O sistema conta com um motor primário monocilíndrico de ciclo diesel e injeção direta com potência de 11 kW a 2000 rpm, um alternador para conversão de energia mecânica em energia elétrica e dois trocadores de calor para recuperação térmica, sendo um dos gases de escape e o outro do fluido de arrefecimento.

No estudo, Perrone, *et al.* (2021) avaliaram o equipamento experimentalmente e comparando os resultados com um modelo matemático de operação do sistema. A eficiência do motor a plena carga foi de 34,5%, determinada pelo modelo matemático e de 34,7%, na avaliação experimental. Para tais valores, os consumos específicos foram respectivamente 268,5 g/kWh e 267,4 g/kWh. Do total de energia que entra com o combustível (100%), 31,1% saem como trabalho elétrico, 25,4% em energia térmica do fluido de arrefecimento, 26,8% em energia térmica dos gases de exaustão, 3,5% de perdas no gerador e 13,2% em outras perdas.

Caligiuri, *et al.* (2022) conduziram um experimento para investigar os efeitos da mistura de biodiesel (0%, 15%, 30% e 100%) e alteração do tempo de injeção no desempenho e nas

emissões de NOx de um micro CHP a diesel. A pesquisa foi desenvolvida utilizando um sistema micro CHP desenvolvido no laboratório da *Facoltà di Scienze e Tecnologie, Libera Università di Bolzano*. O equipamento utiliza um grupo gerador com potência elétrica nominal de 3,9 kW, modelo Paguro 4000 da italiana VTE. A máquina primária é um motor monocilíndrico com Farymann 15W430. O moto gerador foi acoplado a um sistema de recuperação térmica. A dissipação de potência elétrica é feita por um conjunto de lâmpadas halógenas.

Utilizando um sistema de medição com monitoramento online, Caligiuri, et al. (2022), realizaram a caracterização térmica e elétrica através da medição direta da vazão mássica da água de resfriamento, das temperaturas da água quente e fria, da vazão mássica do combustível, e da potência de saída absorvida pelas cargas. A $P_{hr,tot}$ a plena carga variou entre 5,5 e 5,6 kW para qualquer concentração de biodiesel na mistura, entretanto, a $\eta_{hr,tot}$ aumentou com a utilização do biocombustível, variando de 31%, com 0% de biodiesel, para 42% com 100% de biodiesel. Não há dados de massa do equipamento.

Przybyła, et al. (2022) desenvolveram um protótipo micro CHP a partir de um MCI (Kohler LH775) com P_{mec} de 23 kW acoplado a um gerador síncrono com P_{el} de 9 kW. Somente o motor tem massa de 51,7 kg. Os autores adaptaram o MCI para operar com GN e GLP, e o testaram em cinco diferentes potências elétricas (1 kW, 2 kW, 3 kW, 4 kW e 5 kW). No estudo, para cada um dos dois combustíveis, foi variado o coeficiente de excesso de ar sendo a operação com $\lambda=1,0$ e $\lambda=1,3$. O equipamento atingiu eficiência elétrica máxima de 30,7% operando com GN e $\lambda=1,3$ e o FU atingiu o valor de 91%.

3.5.2 Bola de neve

A partir da análise completa dos 19 artigos relatados no Item 3.5.1 foram identificados em suas citações, 13 publicações que se enquadram nos critérios de inclusão e não haviam sido atingidos pelas buscas iniciais. Os documentos identificados por esta técnica, chamada de bola de neve, completam o *corpus* de análise e são discutidos na sequência.

Smith e Few (2001) avaliaram a utilização composta de um dispositivo micro CHP e uma bomba de calor. O objetivo dos autores foi comparar os resultados de alguns modos de operação, como por exemplo, operação do micro CHP com e sem a bomba de calor. O interessante é que os autores construíram um protótipo micro CHP a partir de um moto gerador convencional com arrefecimento a ar e alimentação a gasolina, adaptando-o para operação a GN. A potência elétrica máxima do dispositivo é de 1,15 kW, ou seja, aproximadamente 23% menor do que a potência elétrica máxima operando com gasolina, que era de 1,5 kW. No

protótipo foi instalado um trocador de calor para recuperação da energia térmica dos gases de exaustão. Os pesquisadores comentam que o projeto inicial era de um trocador de calor de casco e tubo de passagem simples, porém, ao realizar alguns testes foi constatado que a efetividade não atingiu 40%. A alternativa foi adotar um trocador de calor de múltiplas passagens, com isso a efetividade superou 80%. A Tabela 14 mostra os resultados de eficiência e potências do protótipo, em diferentes modos de operação.

Tabela 14 – Comparativo de desempenho de Smith e Few (2001)

Modo de operação	P_f (kW)	P_{el} (kW)	$P_{hr,tot}$ (kW)	η_{el} (%)	$\eta_{hr,tot}$ (%)	FU (%)
CHP a plena carga	6,53	0,98	2,89	15,0	44,3	59,3
CHP a carga parcial	4,23	0,28	2,19	6,6	51,2	58,4
CHP + bomba de calor a plena carga	6,65	0,22	4,63	17	69,8	73,0

Fonte: Adaptado de Smith e Few (2001).

Míguez, *et al.* (2004) propuseram e estudaram um sistema de energia total de pequena escala. O dispositivo tem um motor de combustão interna alternativo que move um gerador elétrico e um sistema de recuperação de calor. Simultaneamente, o motor aciona um compressor de bomba de calor. A bomba de calor atende a carga de refrigeração de verão e ajuda a atender a demanda térmica de inverno. O motor é um Honda GX 360-K1 com dois cilindros, deslocamento de 359 cm³, potência nominal de 9,6 kW, arrefecido a água e originalmente alimentado a gasolina, porém, modificado para operar com GN. Os autores realizaram alguns testes considerando diferentes modos de operação e concluem que a bomba de calor aumenta consideravelmente o FU do sistema. As pesquisas continuaram em outros trabalhos, a citar, Rey, *et al.* (2016).

De Paepe, D'Herdt e Mertens (2006) realizaram uma simulação dinâmica de cinco sistemas micro CHP sendo dois SE, dois MCI e uma FC. Os dados comparativos dos equipamentos constam na Tabela 15, onde se observa vantagens nos SE em relação à eficiência de recuperação térmica. Entretanto, no que diz respeito à eficiência elétrica, os MCI e a FC se mostram mais vantajosos.

Tabela 15 – Dados comparativos entre diferentes tecnologias micro CHP

Equipamento	Tecnologia	P_{el} (kW)	$P_{hr,tot}$ (kW)	η_{el} (%)	$\eta_{hr,tot}$ (%)
Senertec Dachs HKA F 5.5	MCI	5,5	12,5	27	61
Ecopower Mini-BHKW	MCI	4,7	12,5	25	65
Solo Stirling 161 microKWK module	SE	2-9,5	8-26	24	72
Whispertech Whispergen	SE	1	4,9-8	12	80
Idatech Fuel Cell	FC	4	9	25	55

Fonte: Adaptado de De Paepe, D'Herdt e Mertens (2006).

Os resultados do estudo de De Paepe, D'Herdt e Mertens (2006) revelaram que para a residência de referência o consumo de energia com a utilização de sistemas micro CHP fica em 81 e 82%, respectivamente para os MCI *Senertec* e *Ecopower*, 88% para a FC e uma grande discrepância entre os SE, onde os valores foram de 73% para o *Solo* e 91% para o *Whispertec*.

Lin, *et al.* (2007) realizaram testes experimentais para avaliar o desempenho de um moto-gerador equipado com motor a diesel de 2 cilindros e arrefecimento a ar, com P_{mec} de 9,5 kW. No experimento foram comparados os dados de desempenho em geração simples (somente energia elétrica) com a trigerção. A recuperação térmica foi feita por meio de dois trocadores de calor, sendo um deles instalado no escapamento do motor e o outro no sistema de arrefecimento. O refrigerador de absorção também opera a partir da energia térmica dos gases de escapamento.

Os resultados dos testes de Lin, *et al.* (2007), mostraram que a eficiência de recuperação térmica total da trigerção chega a 67,3% a plena carga do motor, em comparação com a da geração única original apenas 22,1%. Quanto a recuperação térmica, analisando as situações limites, ou seja, sem carga e a plena carga, foi evidenciado que a $P_{hr,tot}$ vai de 5,54 kW até 11,34 kW. Deste total, a parcela de $P_{hr,a}$ varia de 3,84 kW a 6,43 kW, ao passo que os valores referentes a $P_{hr,g}$ ficaram entre 1,7 kW e 4,91 kW. Por análise dos dados, identifica-se que a energia térmica do sistema de arrefecimento representa 69% do total recuperado, no modo sem carga, e 57% no modo plena carga.

Thomas (2008) avaliou experimentalmente quatro dispositivos micro CHP, sendo dois com MCI e dois com SE. O autor avaliou os resultados experimentais de eficiência e emissões de NOx e CO. Em relação aos parâmetros de eficiência dos sistemas com MCI, o *Senertec Dachs HKA G 5,5*, a plena carga, apresentou η_{el} de 27,7% e FU de 88,5%. Já o *Ecopower Micro-CHP da PowerPlus Technologies* atingiu 24,7% de η_{el} e FU de 88,9% a plena carga. Com 50% de carga, o micro CHP da *PowerPlus* apresentou η_{el} e FU , respectivamente, de 24,0% e 84,5%.

Khatri, *et al.* (2010) avaliaram um sistema micro CHP experimental composto por um motor a diesel monocilíndrico de uso agrícola com η_{mec} de 3,7 kW. No estudo, os autores compararam o desempenho do protótipo em dois modos de operação, sendo um deles considerando somente saída de potência elétrica e o outro modo considerando a trigerção. Para trigerção foram consideradas a $P_{hr,g}$, a $P_{hr,a}$ e a potência de refrigeração obtida por um refrigerador de absorção de vapor. Na operação em modo de trigerção o sistema atingiu eficiência global de 86,21%.

Roselli, *et al.* (2011) realizaram análise experimental de dispositivos micro CHP baseados em diferentes motores primários, dando ênfase aos dados técnicos dos equipamentos, semelhante ao que foi feito por Sibilio, *et al.* (2007). A Tabela 16 mostra os dispositivos micro CHP com base em MCI avaliados pelos autores.

Tabela 16 – Sistemas micro CHP, com MCI avaliados por Roselli, *et al.* (2011)

Equipamento	P_f (kW)	P_{el} (kW)	$P_{hr,tot}$ (kW)	η_{el} (%)	$\eta_{hr,tot}$ (%)	FU (%)	Dimensões (mm)	Massa (kg)	V_{desl} (cm ³)	Ruído (dBA)
Honda Ecowill	4,4	1,0	2,8	22,5	63,0	85,5	580x380x880	83	163	44
Ecopower	18,9	4,7	12,5	24,8	66,0	90,9	760x1370x1080	390	270	56
Senertec Dachs HKA G 5,5	20,5	5,5	12,5	26,8	59,8	86,6	720x1060x1000	530	579	56
Aisin Seiki	20,8	6,0	11,7	28,8	56,2	85,0	1100x660x1500	465	952	54

Fonte: Adaptado de Roselli, *et al.* (2011)

Angrisani, *et al.* (2012) avaliaram experimentalmente o desempenho de sistemas de micro cogeração e micro trigeração. Os dados foram analisados do ponto de vista energético, econômico e ambiental. Os autores citam alguns sistemas micro CHP residenciais comercialmente disponíveis à época, descritos na Tabela 17.

Tabela 17 – Equipamentos micro CHP citados por Angrisani, *et al.* (2012)

Fabricante	P_{el} (kW)	$P_{hr,tot}$ (kW)	FU (%)
Honda e Osaka gas	1,0	2,8	85
Tokyo Gas e Aisin	6,0	11,7	85
Senertec	5,5		
Ecopower	2,0 - 4,7	6,0 - 12,5	85

Fonte: Adaptado de Angrisani, *et al.* (2012).

Equipamentos de refrigeração acionados por calor também são citados por Angrisani, *et al.* (2012). Os pesquisadores utilizaram e seu experimento o sistema micro CHP GECC60A2 NR/P produzido pela AISIN. O dispositivo conta com um MCI que opera a GN, de quatro tempos, com três cilindros e deslocamento total de 952 cm³. Para simulação de estações frias a energia térmica do motor seria utilizada para aquecimento da residência. Já para a estações quentes o calor poderia ser dissipado ou utilizado para acionar um sistema de Absorção Térmica-Química e promover resfriamento dos ambientes, caracterizando, assim, a trigeração. Nos resultados da pesquisa, é relatado que na utilização residencial o sistema avaliado pode ser menos eficiente que a forma tradicional de suprimento de energia térmica e elétrica quando a demanda é da ordem de 0,9 kW, entretanto para demanda de 5,4 kW o sistema avaliado supera a forma tradicional de suprimento de energias.

Para validar experimentalmente o modelo de cogeração, a partir de combustão, do Anexo 42 da Agência Internacional de Energia, Conservação de Energia em Edifícios e Programa de Sistemas Comunitários do governo do Canadá (2008), Rosato e Sibilio (2012) utilizaram um dispositivo de micro CHP AISIN SEIKI GECC60A2 NR/P. O equipamento, que é alimentado por GN, tem um MCI de três cilindros, quatro tempos e deslocamento volumétrico total de 952 cm³. O dispositivo pode modular a saída de P_{el} de acordo com a demanda, até o máximo nominal de 6,0 kW e a $P_{hr,tot}$ nominal é de 11,7 kW. Em plena carga a η_{el} é de 28,8% e a $\eta_{hr,tot}$ atinge 56,2%. Os autores concluem que o consumo de combustível, a produção elétrica e a recuperação de calor apresentaram discrepâncias de -6,1%, -0,2% e -1,0%, respectivamente. Concluiu-se que o modelo fornece uma representação precisa do desempenho dinâmico e em regime permanente da unidade.

Em outro artigo publicado, sobre a experimentação do AISIN SEIKI GECC60A2 NR/P para as comparações, tanto com os resultados obtidos por meio do modelo do Anexo 42 em operação transiente, quanto dos dados de desempenho sugeridos pelo fabricante, Rosato e Sibilio (2013) concluem que apesar de algumas discrepâncias, principalmente durante a operação de resfriamento e aquecimento, o modelo calibrado apresenta concordância com os resultados experimentais, melhorando consideravelmente a estimativa do desempenho do dispositivo de cogeração com base nos valores de eficiência sugeridos pela fabricante. Por outro lado, a comparação entre os dados experimentais e os resultados da simulação mostrou que o modelo do Anexo 42 tende a superestimar o desempenho da unidade micro CHP, principalmente no caso de baixos níveis de potência elétrica.

Rosato e Sibilio (2013B) publicaram um terceiro artigo experimentando a unidade micro CHP de 6 kW de A P_{el} da Aisin. Neste outro trabalho, os autores avaliaram a operação de acompanhamento de carga elétrica durante um teste dinâmico de 24 h com a aplicação de uma carga diária realista e perfil que representa a demanda elétrica doméstica italiana, para conjunto de cinco residências. Os dados medidos foram comparados com os que seriam necessários se o edifício fosse abastecido com eletricidade da rede elétrica e calor de uma caldeira a GN. As avaliações foram realizadas do ponto de vista energético, exergético e ambiental. Os autores concluem que ainda que com a utilização do sistema micro CHP as irreversibilidades sejam 3,9% maiores e o consumo de energia primária seja 3,2% maior, quando comparado ao abastecimento tradicional, onde foi considerada a matriz energética italiana e eficiência de caldeira de aquecimento de 85%, a unidade micro CHP permite reduzir as emissões de dióxido de carbono em cerca de 2%.

Apesar de ser um estudo sobre micro CHP com SE, e não MCI, Ulloa, *et al.* (2013) avaliaram, via simulação, a utilização do sistema micro CHP em um veículo recreativo (um trailer). O RV possui 6,2 m de comprimento, 2,5 m de largura e 2,5 m de altura. O consumo mensal estimado de energia elétrica foi de 31,62 kWh. As simulações de necessidade de energia térmica foram feitas considerando as características térmicas do veículo, em diversas cidades da Europa. A máxima taxa de aquecimento variou de 1,22 kW a 3,29 kW. A relação média entre energia térmica e elétrica foi de 6:1. A eficiência global chegou a 91%. A energia elétrica foi considerada como um subproduto, ou seja, o objetivo primário seria a energia térmica para climatização do RV. Nas simulações os autores constataram que em climas frios o dispositivo forneceria energia elétrica suficiente para atender a demanda. Entretanto, em clima quente, onde a necessidade térmica é menor, o tempo de operação do equipamento não seria suficiente para atender a demanda elétrica.

Outro artigo sobre micro CHP com SE foi publicado por Ulloa, *et al.* (2013) onde realizaram a avaliação experimental de um dispositivo micro CHP com motor Stirling para utilização em embarcações recreativas. O dispositivo micro CHP é o mesmo mencionado em Ulloa, *et al.* (2013), tem massa aproximada de 90 kg e suas dimensões são 450 mm x 500 mm x 650 mm.

Estes dois estudos sobre motor Stirling não estariam de acordo com os critérios de inclusão e exclusão definidos para esta RSL, porém, são citados por serem dedicados a veículos recreativos. Os documentos contêm especificações de massa e dimensões dos dispositivos, bem como dados de desempenho dos sistemas micro CHP avaliados.

3.5.3 Resumo das características técnicas dos equipamentos

Para facilitar a identificação das características dos dispositivos avaliados ou relatados nos artigos da RSL, no Quadro 3 do APÊNDICE E aparecem alguns dados destes equipamentos.

Nota-se uma predominância de estudos com o objetivo de avaliar sistemas micro CHP para residências ou pequenos edifícios. Entretanto, Ulloa, *et al.* (2013), Ulloa, *et al.* (2013), Rey, *et al.* (2015) e Rey, *et al.* (2016) argumentam que os dispositivos propostos destinam-se ou poderiam ser destinados a RVs.

A maioria dos dispositivos utilizam arrefecimento a água, com exceção dos dispositivos micro CHP E-1 e micro CHP E-2, de Possidente, *et al.* (2006), micro CHP E-5, de Smith e Few

(2001) e micro CHP E-6, de Lin, *et al.* (2007), que se tratam de sistemas experimentais com arrefecimento a ar.

O combustível utilizado é predominantemente GN, sendo que muitos podem operar também com GLP. O micro CHP E-4 de Perrone, *et al.* (2021), o Micro CHP E-8 de Caligiuri, *et al.* (2022) e o Senertec Dachs HKA H 5,3 utilizam Biodiesel. Os equipamentos experimentais micro CHP E-6 e micro CHP E-7, respectivamente de Lin, *et al.* (2007) e Khatri, *et al.* (2010), operam com Diesel. Nenhum artigo relata a utilização de gasolina ou etanol como combustível na máquina primária.

Quanto à P_{el} , constam onze sistemas micro CHP até 3 kW, quinze dispositivos entre 4,5 kW e 6 kW, quatro equipamentos entre 6,7 kW e 9,9 kW, além de outros dois que não têm sua P_{el} especificada, mas certamente não ultrapassam 10 kW, haja vista que suas máquinas primárias têm P_{mec} de 3,7 kW e 9,5 kW.

Em relação aos valores de $P_{hr,tot}$, são oito dispositivos de até 4 kW, dez sistemas na faixa de 5,3 kW a 11,7 kW, doze estão na faixa entre 12,3 kW e 21 kW e um último que não têm $P_{hr,tot}$ especificada.

A maioria dos equipamentos tem η_{el} entre 20% e 30%. O Home Power VectorCogen HP-3 desponta com 34% de η_{el} . Os equipamentos experimentais com arrefecimento a ar (micro CHP E-1, micro CHP E-2 e micro CHP E-5) são os eletricamente menos eficientes, em torno de 16%. Já os sistemas experimentais com arrefecimento a água micro CHP E-4, alimentado com Biodiesel, e o micro CHP E-8, alimentado com GN ou GLP, atingem, respectivamente, η_{el} de 31,1% e η_{el} de 30,7%.

Quanto a $\eta_{hr,tot}$ o menos eficiente é o micro CHP E-2, de Possidente, *et al.* (2006), com 38,8%. Cabe ressaltar que neste dispositivo não é feito o aproveitamento da energia térmica do sistema de arrefecimento, apenas dos gases de exaustão. O Senertec HKA G 5.5 é o micro CHP com maior $\eta_{hr,tot}$, que no modelo com condensação, atinge 74%. A maioria dos dispositivos comerciais apresenta $\eta_{hr,tot}$ entre 51% e 66%.

O Home Power VectorCogen HP-3, citado como o dispositivo de maior eficiência elétrica, apresenta baixo valor de eficiência de recuperação térmica, sendo de apenas 43%. O valor pode ser considerado muito baixo para um dispositivo comercial, principalmente se for comparado aos equipamentos experimentais, ou seja, não comerciais, com arrefecimento a ar micro CHP E-5 e micro CHP E-1, respectivamente com 44,3% e 57,4%.

3.6 CONCLUSÕES DA RSL

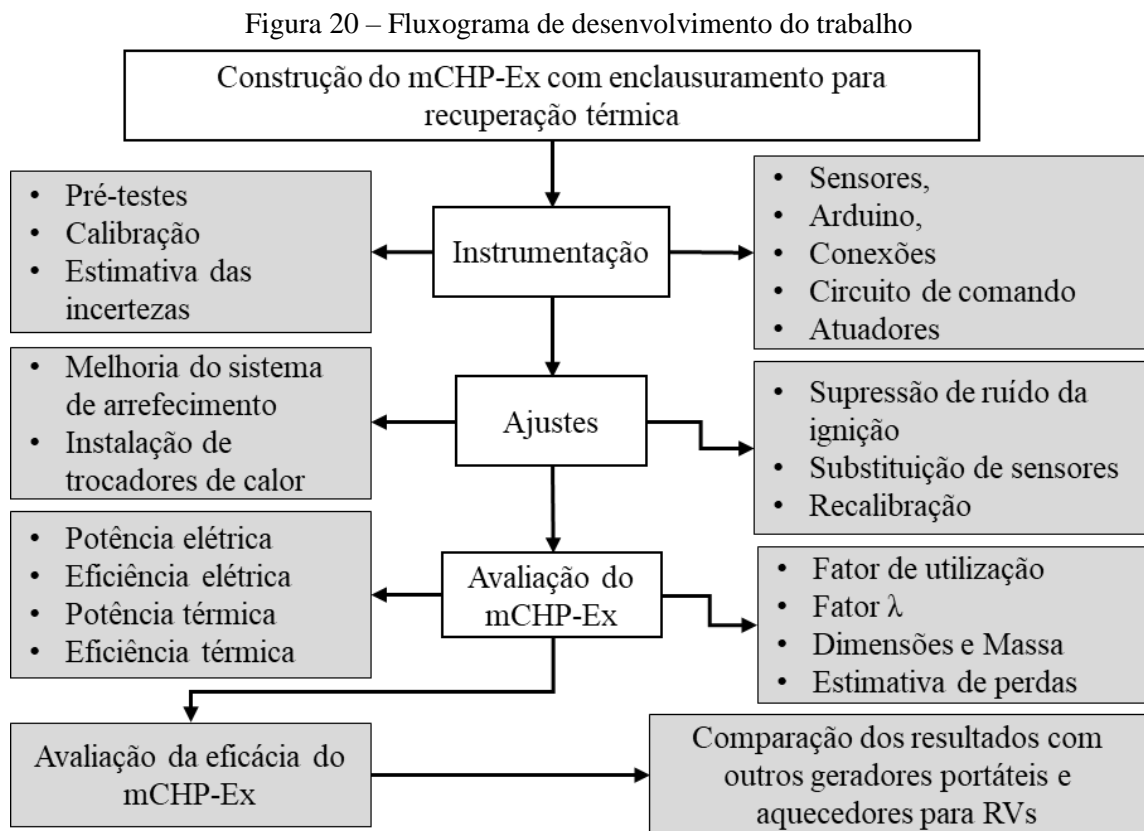
De todas as análises que podem ser feitas no intuito de identificar dispositivos micro CHP para RVs ou adaptáveis em RVs, a massa dos equipamentos é de fundamental importância. A capacidade de carga de um trailer é geralmente baixa, da ordem de 250 kg para trailers de um eixo. Portanto, um dispositivo micro CHP para instalação nestes veículos não poderia ser exageradamente pesado. Porém, são poucos os sistemas micro CHP com massa inferior a 100 kg, a citar o Honda Ecowill, com 83 kg, O Home Power VectorCogen HP-3 com 76 kg e o Honda micro CHP dedicado ao mercado alemão com 68 kg.

Mesmo ao considerar estes três como possíveis opções para RVs, ainda podem ser muito pesados para a aplicação veicular. O ideal é que o dispositivo micro CHP não tenha massa maior que a soma das massas dos três equipamentos que substituiria em um RV, ou seja, o aquecedor de água (5,4 kg), o sistema de calefação (6,4 kg), e um gerador a combustão (22,8 kg), respectivamente vistos em Lorenzetti (2021), Autoterm (2022) e Buffalo (2017). Estes três equipamentos totalizariam 34,6 kg, aproximadamente a metade da massa do dispositivo micro CHP mais leve encontrado nas pesquisas. É possível que os dispositivos experimentais, principalmente os que possuem arrefecimento a ar, tenham menor massa. Entretanto, os autores não revelam tais dados destes equipamentos.

Em resumo, a partir desta RSL, nota-se que existe a possibilidade de desenvolvimento de novas pesquisas, seja com avaliação do desempenho de sistemas micro CHP utilizando outros combustíveis, como gasolina e etanol. Ou ainda, há carência de mais avaliações com dispositivos micro CHP que utilizam arrefecimento a ar, bem como geradores CC. E, por fim, percebe-se como principal carência de pesquisa, estudos de sistemas micro CHP dedicados a RVs, e estas constatações levam a escolha dos objetivos desta pesquisa conforme explícitos no Item 1.5.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho. Constam nos subcapítulos os detalhes sobre a criação do gerador experimental; os equacionamentos aplicados para as avaliações de desempenho; a instrumentação; as incertezas esperadas e a descrição dos ensaios. Para o desenvolvimento deste estudo foi esquematizado um fluxograma, exposto na Figura 20, onde constam as etapas da metodologia do trabalho e sequência de execução.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 CONSTRUÇÃO DO mCHP-Ex

O mCHP-Ex foi montado, utilizando como máquina primária um motor de combustão interna do fabricante Branco modelo B4T-3.0, mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Motor Branco B4T-3.0



Fonte: Branco (2023).

Trata-se de um motor estacionário, a gasolina, de quatro tempos, com arrefecimento a ar, alimentação de combustível por carburador, com controle de velocidade por governador centrífugo e potência mecânica nominal 1692 W (2,3 cv). Na Tabela 18 são mostrados os dados técnicos do motor.

Tabela 18 – Dados técnicos do motor Branco B4T-3.0

Nº de cilindros	1
Deslocamento volumétrico	98 cm ³
Taxa de compressão	9,2:1
Potência nominal	1,7 kW(2,3 cv) a 3600 rpm
Potência máxima	2,2 kW (3,0) cv a 3600 rpm
Torque máximo	4,9 N.m (0,5 kgfm) a 2500 rpm
Massa	9,94 kg

Fonte: Adaptado de Branco (2023).

Junto ao motor, foi instalado um alternador automotivo marca Valeo modelo 03D903025H, com massa de 5,6 kg, tensão nominal de 14 V CC e corrente máxima de 70 A. Figura 22.

Figura 22 – Alternador Valeo 14 V/70A



Fonte: Valeo (2023).

A escolha do motor partiu da busca por um dispositivo leve, de baixo custo e fácil manutenção. O alternador foi especificado a partir da potência mecânica disponível no eixo do motor selecionado. O motor Branco B4T-3.0 tem potência máxima de 3 cv, ou seja, aproximadamente 2200 W. Já o alternador de 14 V CC e 70 A entrega potência elétrica máxima de 980 W. A relação entre a potência mecânica máxima do motor e a potência elétrica máxima do alternador é de 0,44. Portanto, mesmo que as perdas atinjam valores pouco superiores a 50% o motor ainda seria capaz de acionar o alternador.

A montagem do mCHP-Ex ocorreu a partir do desenvolvimento de diversas peças e sistemas para compor um equipamento robusto e durável para os ensaios. O acoplamento entre o motor e o alternador foi feito com uma correia poli-V 6PK597. A polia de 50 mm original do alternador foi mantida e no motor foi instalada uma polia de 88 mm, resultando em uma relação de transmissão de 0,57:1. Para manter o sentido de rotação do alternador, o acoplamento ao motor foi realizado no lado do volante, parte frontal, onde estaria localizado o sistema de partida retrátil original. Com isso, para a partida do motor foi instalado um sistema de partida elétrica da motocicleta Honda Biz 100, na parte traseira do motor.

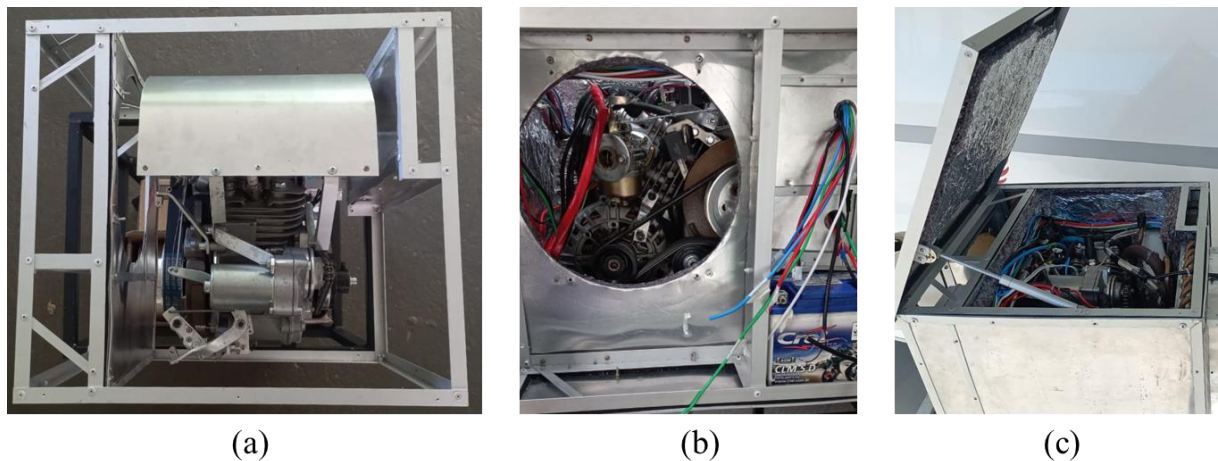
Para avaliar a recuperação térmica do mCHP-Ex foi criado um invólucro, ou carcaça, que tem a função de direcionar os fluxos de ar de arrefecimento do alternador, arrefecimento do motor e gases de exaustão. O invólucro também serve para isolamento térmica do mCHP-Ex e assim diminuir perdas de energia térmica por dissipação de calor para o ambiente.

Para construção do invólucro foram utilizadas chapas de alumínio de 0,5 mm de espessura, perfis de alumínio para estrutura e elementos de fixação como rebites e parafusos. A isolamento foi feita com feltro isolante automotivo aluminizado com aproximadamente 16 mm de espessura aplicado nas paredes internas do invólucro.

O ventilador original, acionado pela árvore do motor, foi retirado, bem como todas as carenagens. O fluxo de ar para arrefecimento passou a ser provido por um eletro ventilador automotivo com diâmetro nominal de 228,6 mm, tensão nominal de 12 V CC e potência nominal de 80 W, sendo este acionado pelo alternador.

Na Figura 23 podem ser vistas três imagens da carcaça do mCHP-Ex, onde, em (a) aparece a estrutura em perfis “L” de alumínio, em (b) a parte frontal com a abertura circular para instalação do eletro ventilador e em (c) a carcaça já fechada com chapas de alumínio, isolante térmico e tampa.

Figura 23 – Invólucro de alumínio para enclausuramento do motor

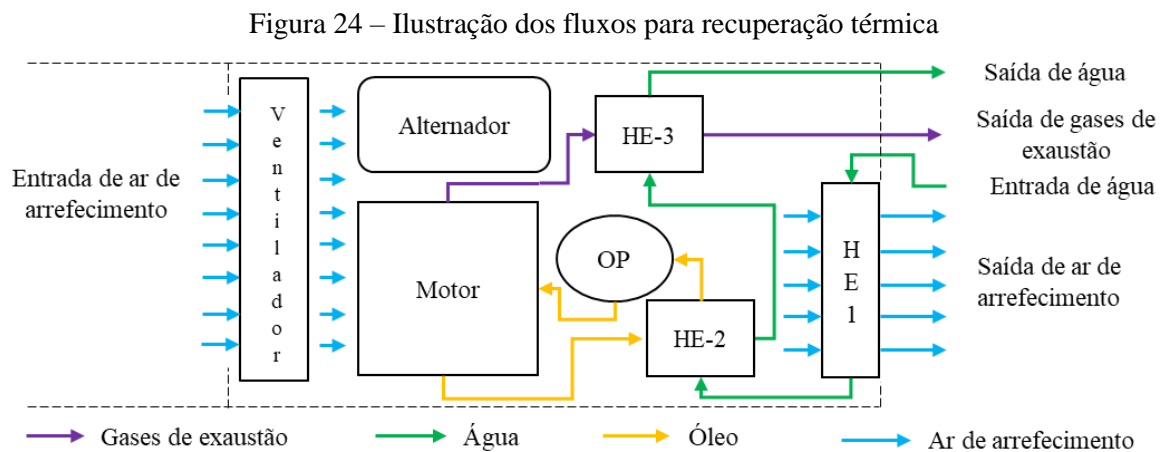


Fonte: Elaborado pelo autor.

No mCHP-Ex ocorre recuperação térmica do ar de arrefecimento, óleo lubrificante e gases de exaustão. O eletro ventilador admite ar atmosférico que é soprado diretamente nas carcaças do motor e alternador e flui até a saída traseira onde está posicionado o trocador de calor HE-1 (ar/água). Neste HE-1 é feita a primeira etapa de recuperação térmica, proveniente da dissipação de calor do alternador e da superfície externa do motor.

O óleo lubrificante escoo, a partir do cárter do motor, por um circuito composto por uma bomba de óleo elétrica (OP), também alimentada eletricamente pelo alternador, e um trocador de calor óleo/água, de uso automotivo, chamado de HE-2, onde ocorre a segunda etapa de recuperação térmica, e retorna ao motor sendo esguichado na parte inferior do pistão.

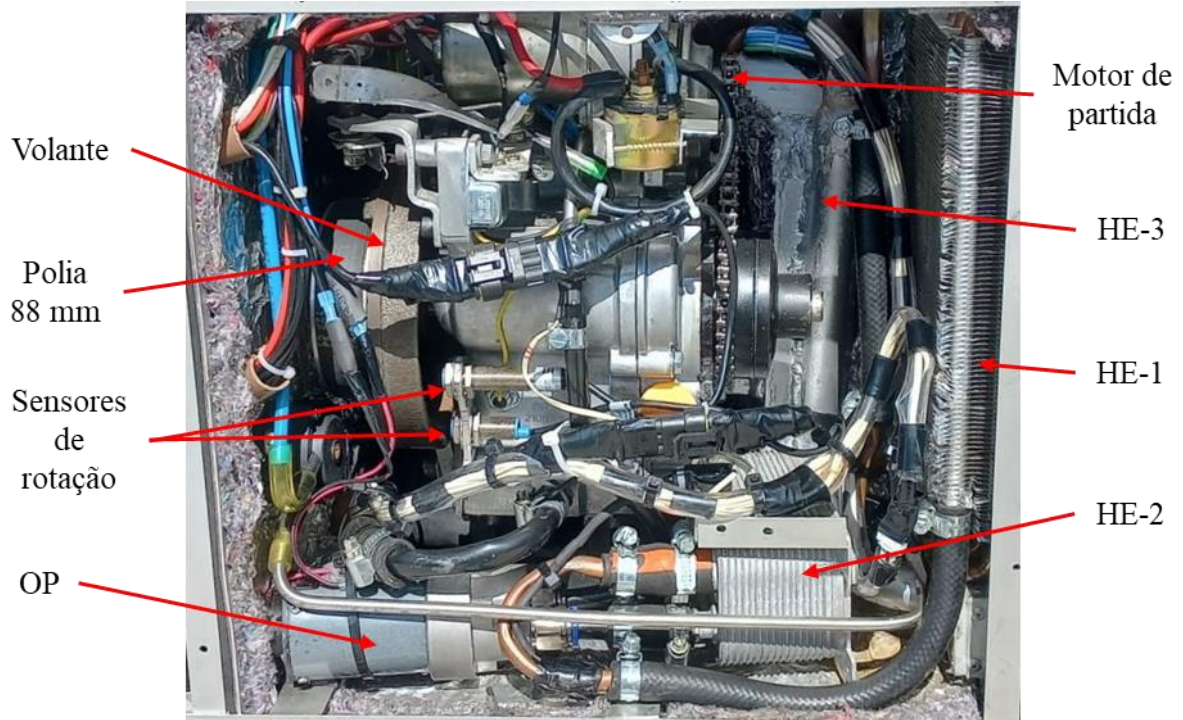
Os gases de combustão do motor passam por um terceiro trocador de calor, o HE-3 (gás/água), onde se completa a recuperação térmica para aquecimento da água. A Figura 24 mostra uma ilustração que identifica os fluxos de ar, óleo, gás de combustão e água.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 25 aparecem alguns componentes da montagem do mCHP-Ex. É possível visualizar: os três trocadores de calor, HE-1, HE-2 e HE-3, respectivamente do ar de arrefecimento, do óleo e dos gases de exaustão; a bomba de óleo elétrica OP; o volante do motor e a polia de 88 mm envolvida pela correia de transmissão do alternador; o motor de partida, sua corrente de transmissão e os sensores de rotação.

Figura 25 – Detalhes da montagem do mCHP-Ex



Fonte: Elaborado pelo autor.

A bomba de óleo utilizada (Figura 26) tem 23 W de potência nominal e opera com tensão de 12 V. A vazão volumétrica teórica é de 1,1 L/min e a pressão máxima de 0,3 MPa.

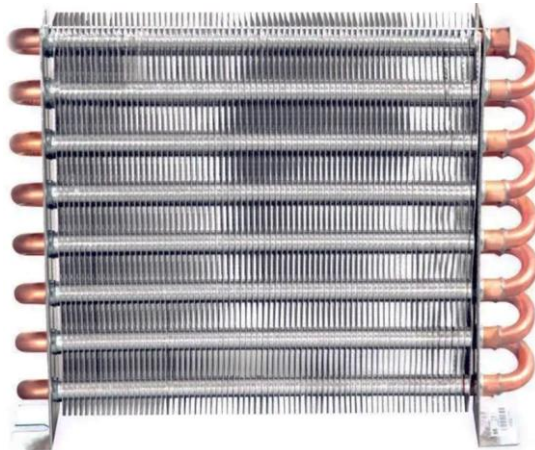
Figura 26 – Bomba de óleo



Fonte: Aliexpress (2023).

O trocador de calor HE-1 é de fluxo cruzado do tipo gás/água, com tubos de cobre, aletas de alumínio no lado do gás, e 16 passes. Suas dimensões são de 225 mm X 45 mm x 210 mm e aparece na Figura 27.

Figura 27 – Trocador de calor HE-1



Fonte: Aliexpress (2023).

O HE-2, mostrado na Figura 28, é um trocador de calor do tipo óleo água todo em alumínio. Trata-se de um dispositivo de uso automotivo utilizado para arrefecimento de óleo de transmissões automáticas.

Figura 28 – Trocador de calor HE-2



Fonte: Mercado Livre (2023).

O HE-3 é semelhante ao HE-1, com dimensões originais de 175 mm X 45 mm X 210 mm. Entretanto, a dimensão de 210 mm foi reduzida para 180 mm para possibilitar a inserção na caixa metálica utilizada como invólucro para o HE-3, como mostrado na Figura 29. Com a redução de 210 mm para 180 mm, o HE-3 ficou com 15 passagens.

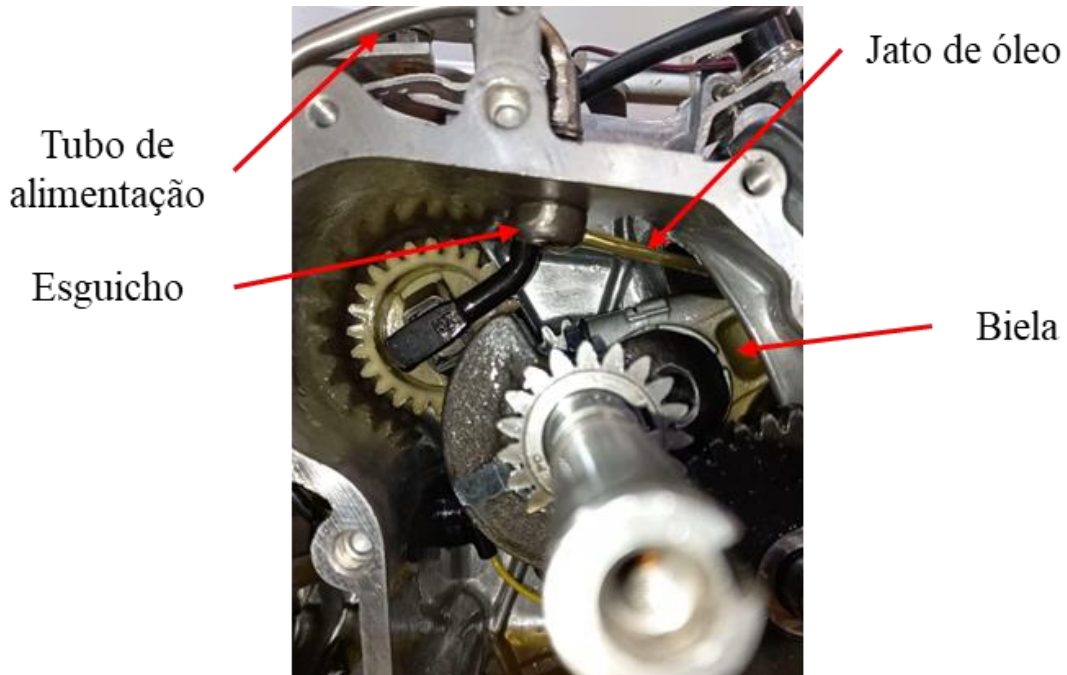
Figura 29 – Trocador de calor HE-3



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma alteração interna feita no motor do mCHP-Ex, foi a instalação de um “esguicho” de óleo sob o pistão. O óleo oriundo do HE-2, já resfriado, é esguichado na cavidade inferior do pistão onde se encontra a ponta da biela e o pino de pistão.

Figura 30 – Esguicho de óleo no pistão

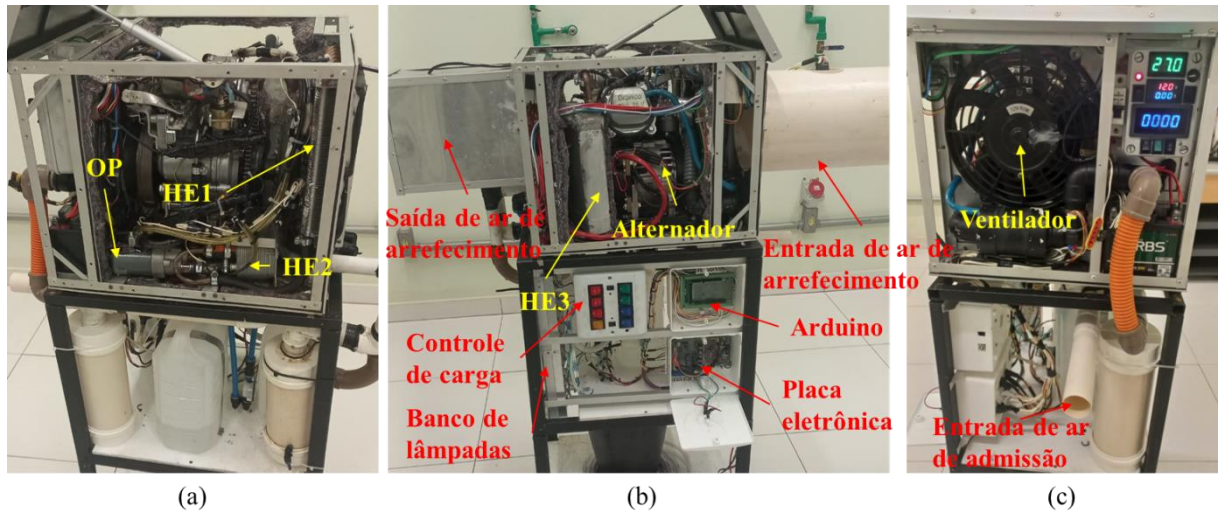


Fonte: Elaborado pelo autor.

A instalação do sistema de circulação de óleo, além de proporcionar a recuperação térmica do fluido lubrificante, permite a operação do motor com carga nominal sem superaquecimento. O motor utilizado no mCHP-Ex teve que ser substituído após os ensaios preliminares realizados para a qualificação do doutorado. A alta solicitação nos ensaios, principalmente com plena carga, ocasionou desgaste prematuro por superaquecimento no primeiro motor.

A Figura 31 mostra o protótipo construído e instrumentado. Em (a) podem ser vistos os trocadores de calor HE1 e HE 2, bem como a bomba de óleo. Em (b) podem ser vistos o alternador, o Arduino e a placa eletrônica para alimentação dos sensores, o HE3, o suporte da lâmpada, as chaves de controle de carga, a entrada e saída de ar de refrigeração. Em (c) podem ser vistos o ventilador e a entrada de ar de admissão. As dimensões totais do mCHP-Ex são: 465 mm de comprimento, 423 mm de largura e 365 mm de altura. A construção foi feita com intuito de obter um equipamento com dimensões reduzidas e assim poder compará-lo a outros dispositivos comerciais. Outros detalhes sobre os sistemas elétricos de controle e instrumentação do mCHP-Ex constam no APÊNDICE A.

Figura 31 – Montagem final do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 DEFINIÇÕES E INSTRUMENTAÇÃO

Para avaliar o mCHP-Ex foram definidas as grandezas de interesse, visando atender aos objetivos definidos no fluxograma da Figura 20, ou seja, a potência de entrada e as potências de saída elétrica e térmica, bem como as eficiências elétrica e de recuperação térmica. As equações empregadas para os cálculos destes dados, juntamente com as equações secundárias necessárias para determinação de outros parâmetros técnicos são listadas e numeradas de (7) a (25):

A Equação (7) define a P_{el} :

$$P_{el} = U \cdot I \quad (7)$$

onde U e I são, respectivamente, a tensão e a corrente elétricas CC entregue pelo alternador.

A $P_{hr,tot}$ corresponde à energia térmica efetivamente entregue ao fluxo de água que passa pelos três trocadores de calor, HE-1, HE-2 e HE-3. Para sua determinação foi utilizada a Equação (9).

$$P_{hr,tot} = \dot{m}_w \cdot c_{p,w} \cdot (T_{w4} - T_{w1}) \quad (8)$$

Onde \dot{m}_w , $c_{p,w}$, T_{w1} e T_{w4} são, respectivamente, a vazão mássica, o calor específico, a temperatura de saída e a temperatura de entrada da água que circula pelo mCHP-Ex .

Para avaliar as recuperações de calor parciais nos três trocadores de calor foram utilizadas, respectivamente, as Equações (9), (10) e (11)

$$P_{HE-1} = \dot{m}_w \cdot c_{p,w} \cdot (T_{w2} - T_{w1}) \quad (9)$$

$$P_{HE-2} = \dot{m}_w \cdot c_{p,w} \cdot (T_{w3} - T_{w2}) \quad (10)$$

$$P_{HE-3} = P_{hr,g} = \dot{m}_w \cdot c_{p,w} \cdot (T_{w4} - T_{w3}) \quad (11)$$

onde T_{w2} e T_{w3} são, respectivamente, as temperaturas do fluxo de água entre HE-1 e HE-2 e entre HE-2 e HE-3.

A recuperação térmica dos gases de exaustão ($P_{hr,g}$), equivale a P_{HE-3} . Entretanto, como a transferência de calor do óleo do motor para a água faz parte do sistema de arrefecimento do motor, o valor da potência de recuperação térmica do sistema de arrefecimento ($P_{hr,a}$), equivale a soma das duas parcelas P_{HE-1} e P_{HE-2} . A Equação (12) foi utilizada para determinação da $P_{hr,a}$:

$$P_{hr,a} = \dot{m}_w \cdot c_{p,w} \cdot (T_{w3} - T_{w1}) \quad (12)$$

As eficiências elétrica e de recuperação térmica dependem da potência de entrada no mCHP-Ex, que se dá pela vazão mássica de combustível (\dot{m}_f) e o seu poder calorífico inferior (PCI_f), que, conforme Nogueira e Hollanda (2015), é de 40200 kJ/kg, referente à gasolina comercial com adição de 26% de etanol anidro. Portanto, a Equação (13) define a potência de entrada pelo combustível (P_f):

$$P_f = \dot{m}_f \cdot PCI_f \quad (13)$$

Sendo assim, a eficiência elétrica (η_{el}) é definida pela Equação (14) como:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_f} \quad (14)$$

A eficiência de recuperação térmica total ($\eta_{hr,tot}$) é definida pela Equação (15)

$$\eta_{hr,tot} = \frac{P_{hr,tot}}{P_f} \quad (15)$$

A potência líquida (P_{net}) é a potência total útil e equivale a soma de P_{el} e $P_{hr,tot}$, conforme Equação(16).

$$P_{net} = P_{el} + P_{hr,tot} \quad (16)$$

A Equação (17) representa o FU que relaciona a potência líquida (P_{net}) com a potência de entrada P_f .

$$FU = \frac{P_{net}}{P_f} \quad (17)$$

Além das potências e eficiências elétrica e de recuperação térmica totais, outras grandezas e relações foram avaliadas no mCHP-Ex, como é o caso da relação ar/combustível (AF) e coeficiente teórico de excesso de ar (λ), bem como a relação entre a potência elétrica e a potência de recuperação térmica total ($P_{el}/P_{hr,tot}$).

A relação AF foi determinada pela Equação (18)

$$AF = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_f} \quad (18)$$

onde \dot{m}_g é a vazão mássica do ar de admissão.

O λ equivale a relação entre o AF real e o AF estequiométrico (AF_e), conforme Equação (19)

$$\lambda = \frac{AF}{AF_e} \quad (19)$$

A relação ($P_{el}/P_{hr,tot}$) pode ser determinada pela Equação (20)

$$P_{el}/P_{hr,tot} = \frac{P_{el}}{P_{hr,tot}} \quad (20)$$

As taxas de consumo específico de combustível foram avaliadas de duas formas, sendo uma delas o SFC_{tot} , considerando como produto a P_{net} , e a outra forma é o SFC_{el} considerando apenas a P_{el} , respectivamente, Equações (21) e (22).

$$SFC_{tot} = \frac{\dot{m}_f}{P_{net}} \quad (21)$$

$$SFC_{el} = \frac{\dot{m}_f}{P_{el}} \quad (22)$$

A eficiência volumétrica (η_v), relação entre a massa de ar real (\dot{m}_g) e massa de ar teórica ($\dot{m}_{g,t}$) admitida pelo motor, foi calculada pela Equação (23), oriunda da Equação (6) do Item 2.1.

$$\eta_v = \frac{2 \cdot \dot{m}_g}{\left(\frac{p_{atm}}{287,058 \cdot (273,15 + T_{g1})} \right) \cdot V_{desl} \cdot N} \quad (23)$$

As equações (24) e (25) estimam as potências perdidas, respectivamente, pelo ar de arrefecimento ($P_{tl,a}$) e gases de exaustão ($P_{tl,g}$) para a situação em que a temperatura da saída se iguale a temperatura da entrada do respectivo fluxo.

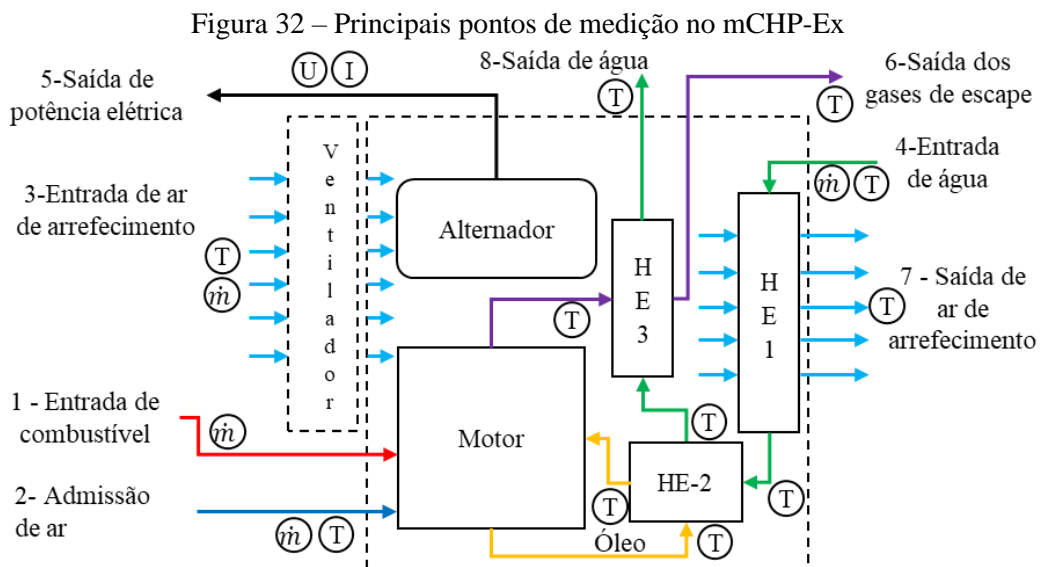
$$P_{tl,a} = \dot{m}_a \cdot c_{p,a} \cdot (T_{a3} - T_{a1}) \quad (24)$$

$$P_{tl,g} = \dot{m}_g \cdot c_{p,g} \cdot (T_{g3} - T_{g1}) \quad (25)$$

Embora se saiba que os gases de exaustão são compostos por diversos gases, para os cálculos foi considerado o calor específico do ar a 27 °C, que conforme Çengel e Boles (2013) é de 1,005 kJ/kg·°C, ou seja, $c_{p,g} = c_{p,a}$.

4.2.1 Instrumentação do mCHP-Ex

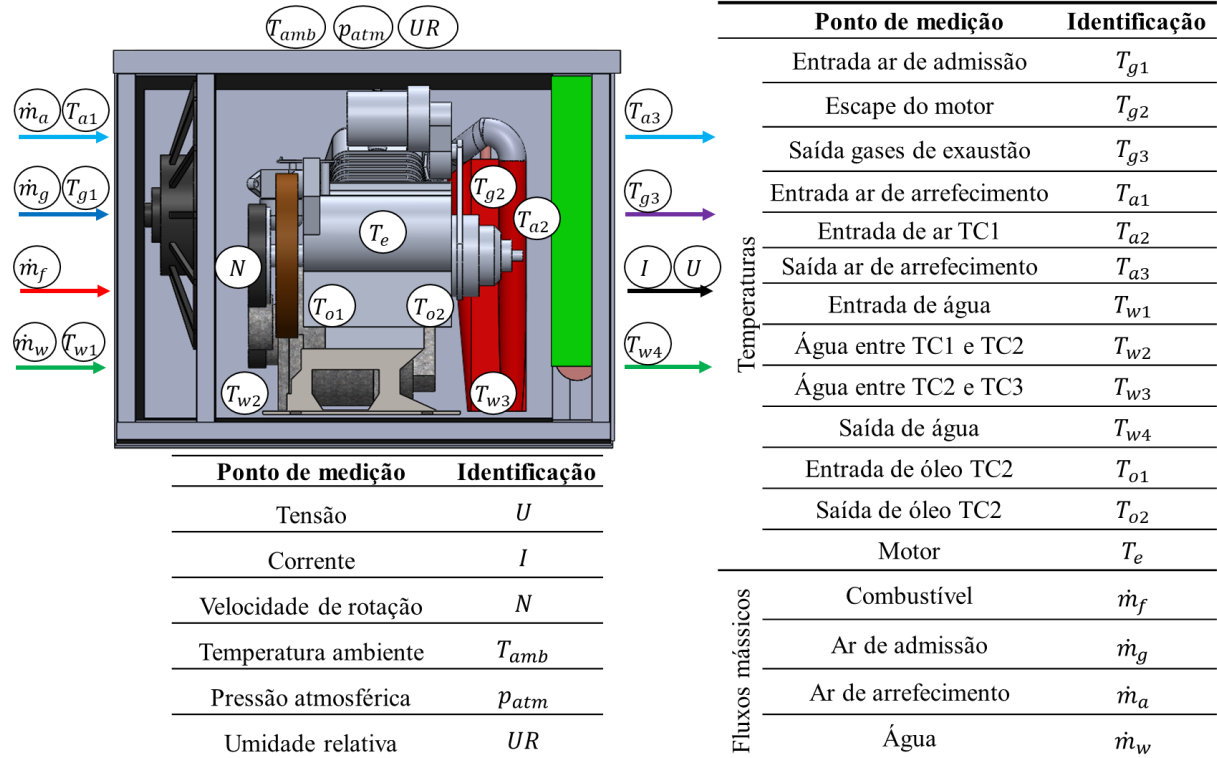
A medição das grandezas que compõem as potências envolvidas no estudo foi realizada por diversos sensores instalados em alguns pontos do equipamento. A Figura 32 representa, esquematicamente, os principais pontos de medição no mCHP-Ex.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 33 mostra um esquema da instrumentação para avaliação do mCHP-Ex. Na ilustração constam as descrições das identificações vistas na Tabela 19

Figura 33 – Instrumentação do mCHP-Ex

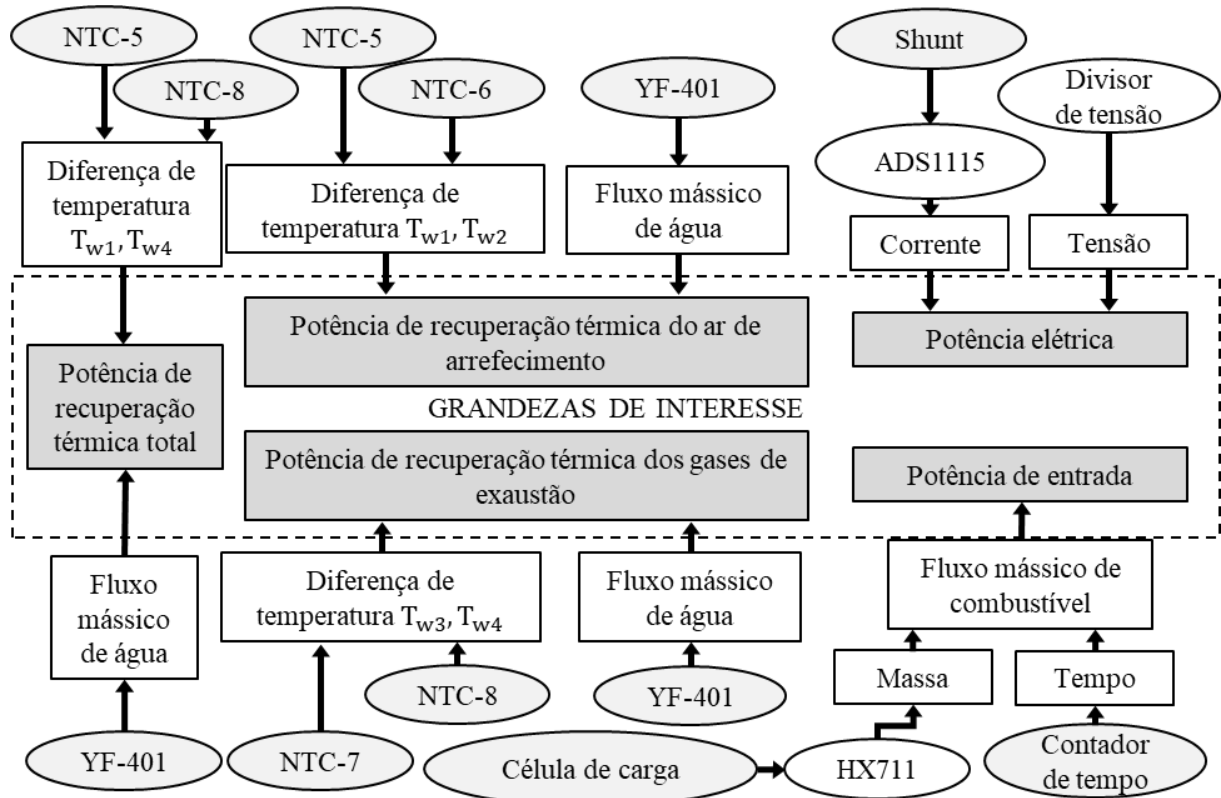


Fonte: Elaborado pelo autor.

Alguns instrumentos podem informar uma leitura direta de uma grandeza, como por exemplo a temperatura de saída dos gases de exaustão, que pôde ser avaliada diretamente por um termopar. Entretanto, como um exemplo de medição composta por outras medições, a determinação da vazão mássica de combustível depende das medições de variação da massa e tempo.

Para melhor entendimento da metodologia de medições no ensaio, a Figura 34 mostra um fluxograma onde as grandezas de interesse são associadas aos seus respectivos instrumentos de medição. As grandezas de interesse são a potência de entrada (P_f), potência elétrica de saída (P_{el}), potência de recuperação térmica total ($P_{hr,tot}$), bem como suas componentes parciais, a potência de recuperação térmica dos gases de exaustão ($P_{hr,g}$) e a potência de recuperação térmica do sistema de arrefecimento ($P_{hr,a}$).

Figura 34 – Composição das grandezas de interesse nas medições



Fonte: Elaborado pelo autor.

A P_f foi determinada a partir da taxa \dot{m}_f , conforme visto na Equação (13). Para se obter a taxa \dot{m}_f foi utilizada uma célula de carga, conectada a um amplificador HX711, além do contador de tempo do hardware de aquisição de dados (arduino). A diferença entre a massa inicial e final de uma etapa de teste, em condições de operação contínua e em regime permanente, dividido pelo tempo cronometrado para a etapa, indicaram o \dot{m}_f , em g/s.

A P_{el} trata-se de uma grandeza composta pelas medições de tensão e corrente de saída, respectivamente indicadas por um divisor de tensão e um *shunt* de 50 A.

A $P_{hr,a}$ e a $P_{hr,g}$ foram determinadas a partir da medição de fluxo de água, com um medidor de fluxo YF-401, e as respectivas diferenças de temperatura em cada sistema, conforme visto nas Equações (11) e (12). Porém, para indicação da $P_{hr,tot}$, foi considerada a diferença de temperatura total entre a entrada e saída do mCHP-Ex ($T_{w4} - T_{w1}$), assim como visto na Equação (8).

Para aquisição dos dados foi utilizado uma placa de prototipagem eletrônica de código aberto modelo Mega 2560. Os sensores e conversores utilizados para cada grandeza, bem como suas incertezas constam na Tabela 19.

Tabela 19 – Incertezas dos sensores para as medições

Grandeza	Sensor	Conversor	Incerteza	Identificação
Consumo de combustível	Célula de carga 5 kg	HX711	1 g	\dot{m}_f
Temperatura no escape do motor	Termopar tipo K	MAX6675	$\pm(0,75\% \text{ ou } 2,2^\circ\text{C})$	T_{g2}
Demais temperaturas	NTC 100k Ω	Divisor de tensão	$\pm 1\%$	$T_{a1}, T_{a2}, T_{a3}, T_{g1}, T_g$ $T_{w1}, T_{w2}, T_{w3}, T_{w4}$ T_{o1}, T_{o2}, T_e
Tensão	Divisor de tensão		$\pm 2\%$	U
Corrente	Shunt 50A-75mV	ADS1115	$\pm 0,5\%$	I
Vazão mássica de água	Sensor de fluxo de água YF-401		$\pm 5\%$	\dot{m}_w
Frequência de rotação	Sensor de efeito Hall NJK-5002C		-	N
Vazão mássica do ar de admissão	MAF1 HFM5 *35 mm	ADS1115	$\pm 3\%$	\dot{m}_g
Vazão mássica do ar de arrefecimento	MAF2 HFM5 *194 mm	ADS1115	$\pm 3\%$	\dot{m}_a
Temperatura ambiente	BME 280		$\pm 1^\circ\text{C}$	T_{amb}
Pressão atmosférica	BME 280		$\pm 1 \text{ hPA}$	P_{atm}
Umidade relativa	BME 280		$\pm 1\%$	UR

* ver Item 4.2.2

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Outras informações sobre a construção e o funcionamento do sistema de aquisição de dados constam no APÊNDICE A.

4.2.2 Calibração dos sensores MAF

Os sensores de massa de ar automotivos, chamados de MAF, que é a sigla para o termo em inglês *Mass Air Flow*, funcionam como anemômetros de fio quente onde um termistor imerso ao fluxo de ar é aquecido por uma corrente elétrica que o mantém a uma determinada diferença de temperatura em relação a outro termistor também posicionado no fluxo de ar. Essa diferença de temperatura entre o termistor aquecido e o termistor frio é geralmente mantida em 100 °C. Conforme a intensidade de fluxo aumenta ocorre o resfriamento do termistor aquecido por dissipação de calor e o circuito do sensor MAF aumenta a corrente circulando por ele para manter a diferença de temperatura. A leitura de fluxo em massa por tempo é feita por conversão de um sinal de tensão de saída proporcional ao fluxo de ar (ROBERT BOSCH GMBH, 2021).

Os sensores MAF utilizados para os fluxos de ar de admissão (MAF-1) e ar arrefecimento (MAF-2) foram montados em tubos de PVC com diâmetros internos,

respectivamente, de 35 mm e 194 mm. Isso foi necessário para adequar os MAFs aos fluxos de admissão e arrefecimento, haja vista que em sua carcaça original, com diâmetro interno de 62 mm, os sensores operam em uma faixa de vazão mássica de 10 kg/h a 480 kg/h (0,00278 kg/s a 0,13333 kg/s). A vazão mássica de ar de admissão do motor utilizado neste trabalho está entre os valores de 0,001 kg/s e 0,004 kg/s, dependendo da frequência de rotação e carga aplicada.

A vazão mássica de ar de arrefecimento é de aproximadamente 0,1 kg/s e está dentro da faixa de medição do MAF em sua carcaça original, entretanto, como a entrada de ar do mCHP-Ex tem uma abertura de 194 mm de diâmetro, o tubo original do MAF, que tem 62 mm de diâmetro, causaria uma grande restrição ao fluxo criado pelo ventilador axial. Portanto, isso explica a necessidade de adaptar o MAF-2 ao tubo de diâmetro nominal de 194 mm. Os procedimentos de calibração dos MAFs constam no APÊNDICE B.

4.2.3 Calibração dos termistores NTC

Para as medições de temperatura foram utilizados termistores NTC com resistência nominal de 100 k Ω a 25 °C. Os termistores NTC tem como característica a variação da sua resistência elétrica inversamente proporcional a variação da temperatura a que estão expostos. Para as avaliações operacionais do mCHP-Ex, são tomadas medições de temperatura nos fluxos de ar, água, gases de combustão e óleo lubrificante, além da temperatura do motor. Esses diversos pontos de medição apresentam temperaturas que variam desde a temperatura ambiente até temperaturas da ordem de 480 °C. A capacidade de medição dos termistores é limitada a 320 °C, portanto, os termistores foram utilizados nos pontos onde a temperatura não ultrapassa este limite. Os gases de combustão na saída do motor (T_{g2}) apresentam temperatura maior que 320 °C, portanto, neste ponto, foi utilizado um termopar tipo K. Para assegurar a confiabilidade dos valores de temperatura dos diversos pontos de medição os termistores NTC foram calibrados utilizando-se um banho termostático Quimis Q214M, do laboratório de ciências térmicas da Unisinos, para a faixa de temperatura de 7,31 a 78,75 °C. O limite superior foi determinado pela capacidade do fluido do banho termostático operar sem evaporação demasiada, porém, a temperatura dos gases de combustão na saída para atmosfera, em algumas condições de operação, supera 78,75 °C atingindo valores próximos a 100 °C. Para contemplar esta temperatura, foi adotada a relação da resistência com a temperatura exposta no datasheet do sensor (faixa 6). A temperatura do motor também supera a temperatura máxima da calibração com o banho termostático, chegando à ordem de 142 °C, valor que ultrapassa inclusive a tabela publicada no datasheet do sensor, que é de 125 °C. Portanto, um procedimento

de calibração complementar foi realizado com um sistema composto por um soprador térmico, um medidor de temperatura, e um medidor de resistência, para a temperatura de 161 °C. A temperatura do motor é apenas um dado complementar nos ensaios e não influencia nas medições de potência e eficiência. A Tabela 20 mostra os valores obtidos com a calibração dos NTCs. Outros detalhes sobre os resultados desta calibração constam no APÊNDICE C.

Tabela 20 – Resumo do procedimento de calibração dos NTCs

Faixa	Resistência (Ω)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Incerteza \pm ($^{\circ}\text{C}$)	Meio de calibração
1	210880	7,35	0,012	Banho termostático
2	121714	19,66	0,010	
3	54000	39,56	0,012	
4	25493	59,17	0,010	
5	12960	78,75	0,012	
6	6498	100,00	1,304	<i>Datasheet</i>
7	729,2	161,00	2,850	Medidor de temperatura MT-455A

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.3 PREPARAÇÃO DO ENSAIO DO mCHP-Ex

O ensaio experimental foi realizado com o protótipo instrumentado conforme descrito no Item 4.2.1. Os regimes de operação foram definidos arbitrariamente, explorando toda a faixa de frequência de rotação (N) recomendada pelo fabricante do motor, de 2000 rpm a 3600 rpm, e operando em condições de carga variadas, desde a inexistência de carga até a carga máxima para determinada frequência de rotação.

A imposição de carga ao mCHP-Ex foi feita por meio de um banco de doze lâmpadas halógenas cada uma com potência nominal de 55 W e tensão de 12 V. Neste banco de carga o controle das lâmpadas é realizado com oito interruptores, de modo que quatro deles acionam duas lâmpadas cada e os outros quatro acionam uma lâmpada cada.

4.3.1 Definição dos limites de carga do mCHP-Ex

Os limites de carga foram determinados em um ensaio preliminar onde se verificou a máxima corrente líquida possível no alternador, para cada faixa de frequência de rotação. Além disso, também foi verificada a tensão necessária para o acionamento do eletro ventilador e bomba de óleo, para manter a temperatura do motor abaixo de 140 °C. A experimentação foi feita com o motor em operação com a carga variável conectada ao alternador. A corrente imposta ao alternador foi variada de forma crescente até a parada do motor por sobrecarga. A

corrente máxima determinada corresponde a corrente referente ao número de lâmpadas imediatamente inferior ao que causou a sobrecarga ao motor, ou seja, se para um determinado regime de rotação o motor sofreu sobrecarga com a corrente de dez lâmpadas ligadas, o limite máximo de carga para tal regime de rotação corresponde a corrente de nove lâmpadas ligadas. Os valores de corrente constam na Tabela 21. Cabe ressaltar que as correntes de consumo da ventoinha e da bomba de óleo não foram contabilizadas nestes valores.

Tabela 21 – Limites de carga para o mCHP-Ex

<i>N</i> (rpm)	Nº Lâmpadas	Corrente (A)	Tensão no eletro ventilador e bomba de óleo (V)
2000	5	26,0	6,8
2200	6	30,8	7,5
2400	7	35,7	8,2
2600	8	40,5	8,9
2800	9	45,3	9,5
3000	10	50,0	10,5
3200	10	50,0	10,5
3400	11	54,7	11,0
3600	12	57,8	11,4

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na frequência de rotação de 3600 rpm o motor sofreu desligamento por sobrecarga com doze lâmpadas ligadas portanto foi colocada uma resistência em série com a lâmpada número 12 do quadro de cargas, fazendo com que a corrente circulando por esta seja um pouco menor, permitindo a operação do mCHP-Ex sem sobrecarga.

4.3.2 Planejamento do ensaio do mCHP-Ex

Com os limites de carga estabelecidos, foi planejado realizar o ensaio final do mCHP-Ex explorando toda a gama de frequência de rotação recomendada pelo fabricante do motor, combinadas com diferentes condições de carga, desde a condição sem carga, passando por condições de carga parcial até a condição com carga plena, totalizando 46 etapas. Cada etapa corresponde a uma determinada condição de operação definida pela frequência de rotação e carga imposta ao alternador. Tais etapas estão relacionadas na Tabela 22 onde constam os valores de *N*, número de lâmpadas, corrente teórica estimada, percentual de carga (em relação a corrente de carga máxima) e ordem de realização da etapa no ensaio.

Tabela 22 – Condições de operação nos ensaios experimentais

N (rpm)	Nº Lâmpadas	Corrente teórica (A)	Carga* (%)	Ordem
2000	0	0,0	0	46°
	1	5,2	20	45°
	2	10,4	40	44°
	3	15,6	60	42°
	4	20,8	80	39°
	5	26,0	100	35°
2200	2	10,3	33	43°
	3	15,4	50	41°
	4	20,5	67	38°
	5	25,7	83	34°
	6	30,8	100	30°
	2400	3	15,3	43
4		20,4	57	37°
5		25,5	71	33°
6		30,6	86	29°
7		35,7	100	24°
2600		4	20,3	50
	5	25,3	63	32°
	6	30,4	75	28°
	7	35,4	88	23°
	8	40,5	100	18°
	2800	5	25,2	56
6		30,2	67	27°
7		35,2	78	22°
8		40,3	89	17°
9		45,3	100	12°
3000		6	30,0	60
	7	35,0	70	21°
	8	40,0	80	16°
	9	45,0	90	11°
	10	50,0	100	7°
	3200	6	30,0	60
7		35,0	70	20°
8		40,0	80	15°
9		45,0	90	10°
10		50,0	100	6°
3400		7	34,8	64
	8	39,8	73	14°
	9	44,8	82	9°
	10	49,7	91	5°
	11	54,7	100	3°
	3600	8	39,8	69
9		44,8	77	8°
10		49,7	86	4°
11		54,7	95	2°
12		57,8	100	1°

* Em relação à corrente de carga máxima

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Planejou-se realizar os ensaios iniciando com a condição de maior carga e frequência de rotação (3600 rpm e 12 lâmpadas ligadas) e finalizando com a condição sem carga com menor frequência de rotação (2000 rpm sem nenhuma lâmpada ligada). A ordem de redução de carga e frequência de rotação se deu de forma que a potência de entrada diminuísse gradativamente, reduzindo-se primeiramente o número de lâmpadas ligadas e depois a frequência de rotação. Para exemplificar esta ordenação, lista-se as dez primeiras e a última etapa de ensaio (frequência de rotação/número de lâmpadas ligadas): 3600/12, 3600/11, 3400/11, 3600/10, 3400/10, 3200/10, 3000/10, 3600/9, 3400/9... até ... 2000/0.

Decidiu-se adotar esta ordem para reduzir o tempo de estabilização entre as etapas, quando comparado a ordem em que se realizaria as etapas escalonadas primeiramente por frequência de rotação e depois carga. Além disso, a justificativa para adoção da ordem decrescente ao invés da ordem crescente, é também a redução dos tempos entre etapas, haja vista que, conforme percebido em ensaios prévios, o mCHP-Ex apresenta uma taxa de redução de temperatura mais elevada do que a taxa de aumento de temperatura entre cada etapa, ou seja “esfria-se” mais rapidamente do que “se aquece”. A estabilização foi verificada por avaliação das temperaturas do motor dos gases de exaustão e da água. O tempo de ensaio planejado para cada etapa foi de 8 minutos totalizando aproximadamente 380 medições por etapa.

4.4 COMBINAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

Conforme o Guia para Expressão da Incerteza de Medição (2003), a incerteza individual de uma determinada medição pode conter duas componentes, sendo elas a incerteza tipo A (I_A), que é determinada estatisticamente por um ensaio em que são realizadas várias tomadas de valores do parâmetro a ser verificado; e a incerteza tipo B (I_B) que consiste na incerteza inerente do instrumento de medição. A combinação das incertezas tipo A e tipo B, resulta na chamada combinada tipo C (I_C) que pode ser calculada a partir da Equação (26).

$$I_C = \pm \sqrt{I_A^2 + I_B^2} \quad (26)$$

Quanto à associação de instrumentos de medição para determinação de um valor final, como por exemplo a medição de saída de potência elétrica do mCHP-Ex, composta por medições de tensão e corrente, implica na propagação de incertezas. As incertezas individuais (I_1, I_2, \dots, I_n) dos instrumentos devem ser computadas para a incerteza final (I_R). Kline e

McClintock (1953) definem a Equação (27) para calcular a incerteza propagada, sendo esta, um parâmetro R função de duas ou mais variáveis independentes.

$$I_R = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} I_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} I_2\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} I_n\right)^2} \quad (27)$$

As incertezas tipo B são as incertezas propagadas, calculadas para cada grandeza com os dados de cada instrumento ou sensor utilizado para sua obtenção. As incertezas finais (tipo C) das grandezas de interesse foram compostas por incertezas tipo A, obtidas estatisticamente nos ensaios e as incertezas tipo B (incertezas individuais dos sensores).

Conforme visto em Albertazzi e Souza (2008) o desvio padrão amostral equivale à incerteza padrão e quando dividido pela raiz quadrada do número de medições, realizadas para sua determinação, indica a incerteza padrão da média ($I_{méd}$), Equação (28).

$$I_{méd} = \bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (28)$$

Onde $\bar{\sigma}$ é o desvio padrão da média, σ representa o desvio padrão amostral e n indica o número de medições efetuadas.

As incertezas dos ensaios do mCHP-Ex foram determinadas a partir da propagação de incertezas associando todos os sensores e instrumentos utilizados para determinação de cada grandeza de interesse. Os procedimentos para determinação das incertezas finais bem como as tabelas com dados das incertezas combinadas e propagadas constam no APÊNDICE D.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são expostos os resultados dos ensaios de desempenho do mCHP-Ex. As 46 baterias de ensaios foram realizadas no dia 22/10/2023 conforme planejamento visto na Tabela 22 do Item 4.3.2. As etapas tiveram tempo de duração variando entre 8 minutos e 7 segundos, 8 minutos e 8 minutos e 17 segundos. No total, o tempo contabilizado somente para aquisição de dados foi de aproximadamente 6 horas. Entretanto, contabilizando também os períodos dedicados ao ajuste e estabilização entre cada teste, o tempo total de operação do mCHP-Ex para realização do ensaio operacional superou 12 horas. Antes dos ensaios finais utilizados nas análises, outras duas tentativas de realização de ensaios também ocorreram com longos períodos de operação do protótipo. Estima-se que entre setembro e outubro de 2023 o mCHP-Ex tenha operado por aproximadamente 36 horas.

No APÊNDICE E são mostradas as tabelas de resultados dos ensaios, onde, primeiramente são mostradas as tabelas de registros das medições primárias, ou seja, aquelas registradas diretamente pelo sistema de aquisição de dados. Iniciando-se pela frequência de rotação e condições ambientais (temperatura ambiente, pressão atmosférica e umidade relativa do ar), posteriormente são mostrados os dados utilizados para determinar as grandezas de interesse (temperaturas, vazões mássicas, tensão e corrente no alternador, variação da massa de combustível e tempo de ensaio) e outros dados secundários (Consumo de combustível, relação A/f , fator λ). Em seguida são mostradas as tabelas de resultados calculados, referente às grandezas de interesse (eficiências e potências) e por fim, constam os dados complementares (relações entre as potências e consumo específico de combustível). Todos os dados equivalem as médias dos registros realizados durante o ensaio para cada condição de operação, acompanhados das respectivas incertezas absolutas e relativas. Os dados foram computados, em média, a cada 1,25 segundos e cada grandeza foi medida 374 ou 375 vezes.

Nos gráficos em que os dados aparecem em função das condições de operação, a identificação de cada condição de operação é feita com a indicação da frequência de rotação e do percentual de carga imposta ao gerador, que equivale ao valor de potência em relação ao máximo de potência da respectiva frequência de rotação.

5.1 MEDIÇÕES PRIMÁRIAS

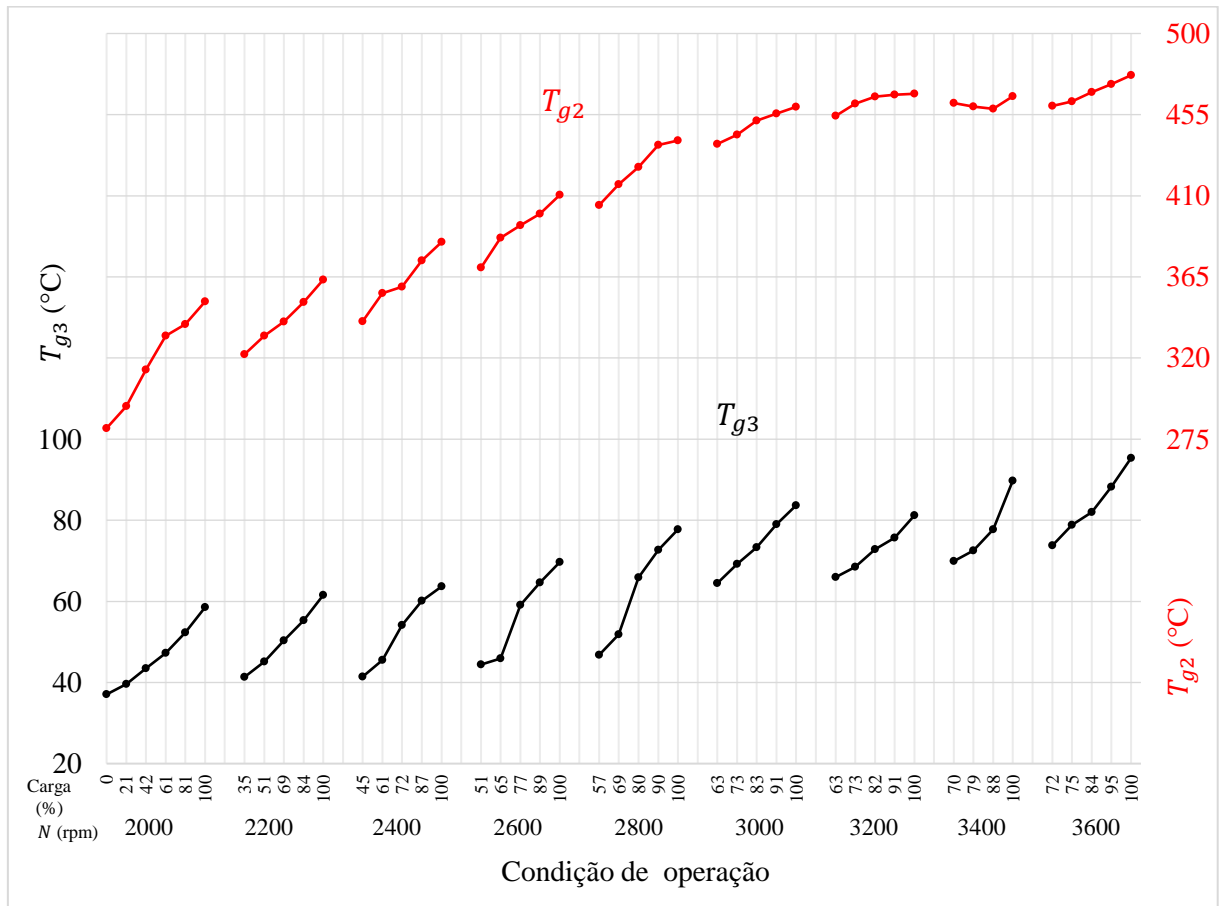
Na Tabela 35 do APÊNDICE E constam os dados de temperatura ambiente (T_{amb}), pressão atmosférica (P_{atm}), umidade relativa (UR) do ar e frequência de rotação (N). Estes

dados não interferem nos cálculos das grandezas de interesse vistas na Figura 34 do Item 4.2.1, portanto não são discutidos individualmente, apenas aparecem para caracterizar as condições ambientais do ensaio, que não apresentaram grandes variações, e para definir a N do motor em cada etapa do ensaio.

5.1.1 Temperaturas dos fluxos

As temperaturas do fluxo de ar de admissão/gases de exaustão podem ser vistas na Tabela 36 do APÊNDICE E. A temperatura do ar de admissão (T_{g1}) variou de $25,45\text{ °C} \pm 0,01\text{ °C}$ a $29,08\text{ °C} \pm 0,02\text{ °C}$, sendo justificada pela variação natural da temperatura ambiente do laboratório ao longo do dia em que foi realizado o ensaio. A partir dos registros das temperaturas T_{g2} e T_{g3} (gases na exaustão), foi criado o gráfico mostrado na Figura 35, onde nota-se picos ocorrendo nas condições de maior carga de cada faixa de N .

Figura 35 – Temperaturas dos gases de exaustão

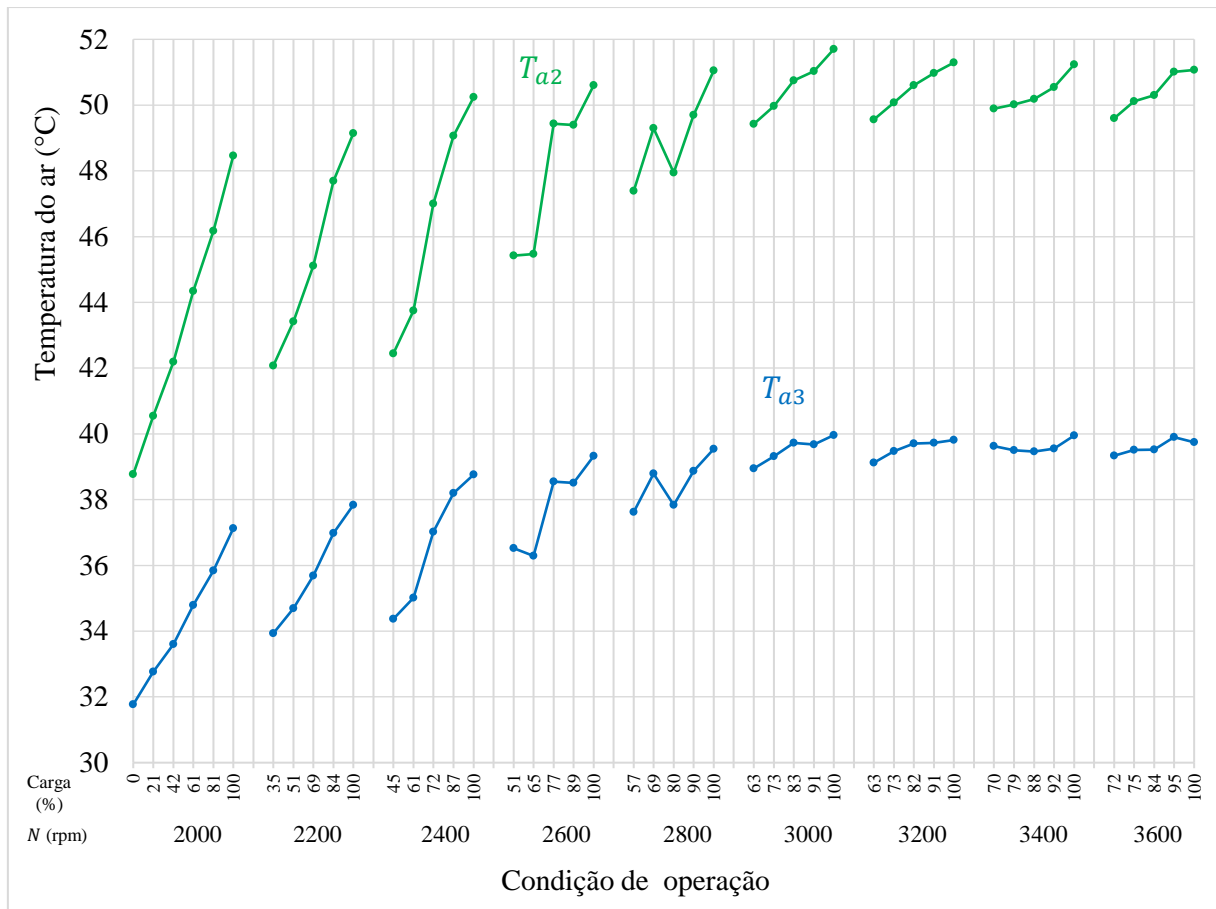


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A temperatura dos gases de exaustão na saída do motor (T_{g2}) apresentou variação entre $281,0\text{ °C} \pm 2,2\text{ °C}$ e $476,8\text{ °C} \pm 2,2\text{ °C}$. A amplitude de valores se justifica pela variação de carga e frequência de rotação nas etapas do ensaio, ou seja, em condições de operação em que o sistema tem solicitações mais acentuadas ocorre maior temperatura dos gases de exaustão do motor, o que se dá naturalmente pela queima de maiores quantidades de combustível. A inclinação das curvas é mais pronunciada nas frequências de rotação mais baixas pois a amplitude de carga nessas condições é maior, como por exemplo, carga de 0 a 100% na faixa de 2000 rpm, em comparação a carga de 72% a 100% na faixa de 3600 rpm. A temperatura dos gases de exaustão na saída para atmosfera, pós recuperação térmica no HE-3 (T_{g3}), teve seus valores mínimo e máximo de, respectivamente, $37,07\text{ °C} \pm 0,01\text{ °C}$ e $95,33\text{ °C} \pm 1,32\text{ °C}$. A distribuição dos valores no gráfico apresentou formato conforme esperado, ou seja, crescente com a carga e frequência de rotação. É possível observar que há uma maior diferença de temperatura dos gases de exaustão quando a rotação e a carga aumentam. Esse comportamento é esperado porque temperaturas maiores de T_{g2} propiciam maior recuperação térmica no HE-3, melhorando o *FU*.

Na Tabela 37 do APÊNDICE E constam as temperaturas do fluxo de ar de arrefecimento. A temperatura deste fluxo na entrada do mCHP-Ex (T_{a1}) apresentou variação entre $23,20\text{ °C} \pm 0,01\text{ °C}$ a $27,34\text{ °C} \pm 0,02\text{ °C}$, naturalmente em função da variação da temperatura do ar dentro da sala de ensaios, assim como ocorrido com a T_{g1} . A temperatura do ar antes do HE-1 (T_{a2}) teve seu valor mínimo de $38,77\text{ °C} \pm 0,01\text{ °C}$ e seu máximo foi de $51,70\text{ °C} \pm 0,03\text{ °C}$. Já na saída do mCHP-Ex, pós recuperação térmica no HE-1, a temperatura (T_{a3}), variou entre, $31,77\text{ °C} \pm 0,01\text{ °C}$ e $39,96\text{ °C} \pm 0,02\text{ °C}$. Na Figura 36 são mostradas as curvas de temperatura T_{a2} e T_{a3} em função das condições de operação.

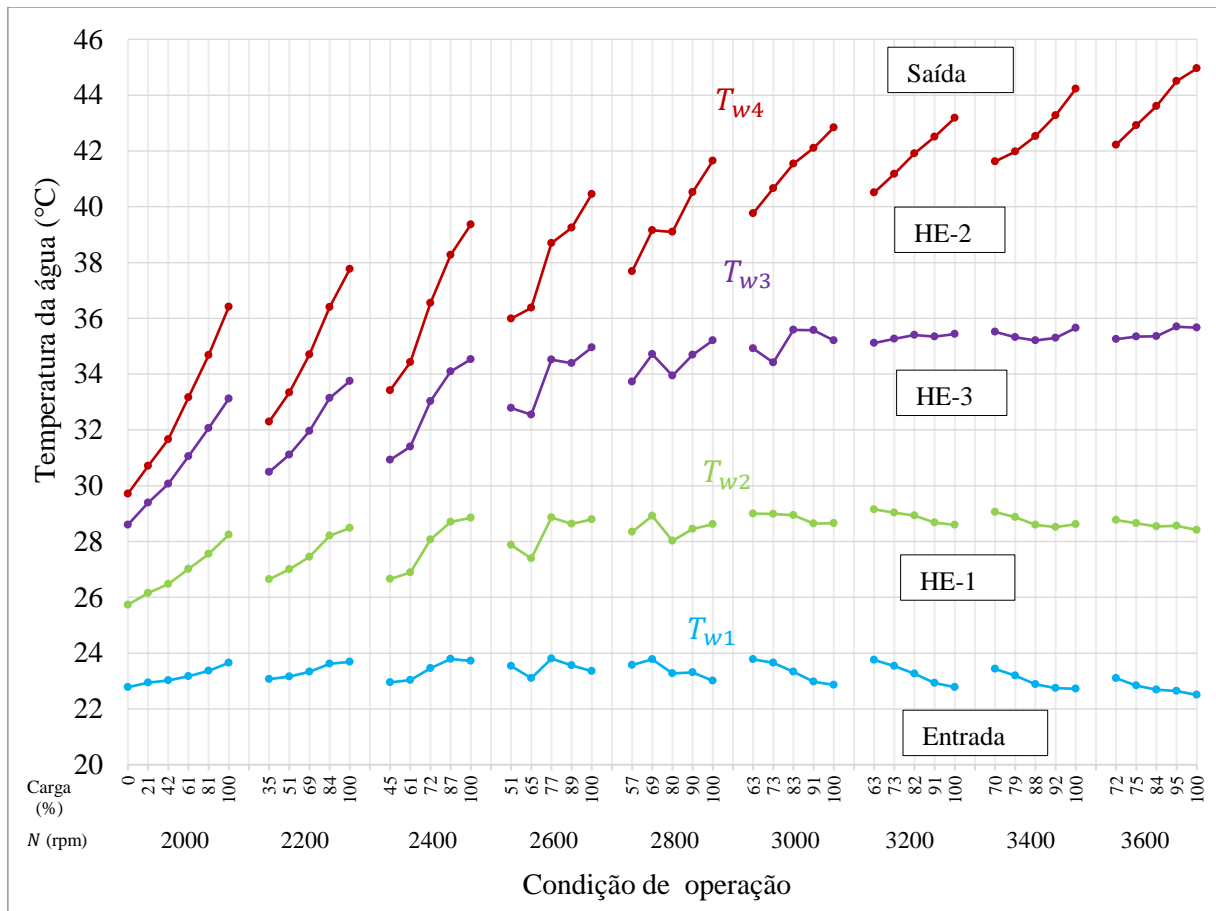
Figura 36 – Temperaturas do ar de arrefecimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As temperaturas do fluxo de água que circula pelos trocadores de calor aparecem na Tabela 38 do APÊNDICE E. Os valores mínimos e máximos foram, respectivamente, $22,50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $23,80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$, na entrada (T_{w1}), $25,73\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $29,15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$, no ponto entre HE-1 e HE-2 (T_{w2}), $28,60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $35,70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,33\text{ }^{\circ}\text{C}$, no ponto entre HE-2 e HE-3 (T_{w3}) e $29,71\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $44,95\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ na saída (T_{w4}). Na Figura 37 são mostradas as curvas de temperatura do fluxo de água no mCHP-Ex. Nota-se que a T_{w4} sofre maior influência pelo aumento na frequência de rotação do que T_{w2} e T_{w3} . No gráfico está ilustrada a posição de cada trocador de calor em relação as curvas de temperatura. A distância relativa entre as curvas indica a magnitude da recuperação térmica em cada trocador de calor. No HE-1, a recuperação térmica do ar de arrefecimento sofre menos variação ao longo das etapas do ensaio, quando comparado às variações da magnitude da recuperação térmica do óleo (HE-2) e dos gases de exaustão (HE-3). Inclusive a recuperação térmica no HE-2, em algumas etapas do ensaio, é maior do que no HE-1 e HE-3.

Figura 37 – Temperaturas da água



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com o aumento da frequência de rotação a vazão de ar de arrefecimento também é elevada, ocasionando maiores perdas de recuperação térmica no HE-1. Esta pode ser a explicação para a T_{w2} sofrer menores alterações com a elevação de N .

A temperatura do motor (T_e), bem como as temperaturas do óleo lubrificante (T_{o1} e T_{o2}), apesar de não fazerem parte das variáveis utilizadas para determinação das grandezas de interesse, também foram monitoradas nos ensaios. A T_e apresentou valor mínimo de $98,96 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2,85 \text{ }^\circ\text{C}$ e máximo de $141,1 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2,85 \text{ }^\circ\text{C}$. A T_{o1} (temperatura do óleo que sai do motor e vai para o HE-2) variou de $51,71 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,02 \text{ }^\circ\text{C}$ a $65,49 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,04 \text{ }^\circ\text{C}$. E a T_{o2} (temperatura do óleo que sai do HE-2 e retorna para o motor) ficou entre $27,67 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ a $32,18 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,02 \text{ }^\circ\text{C}$.

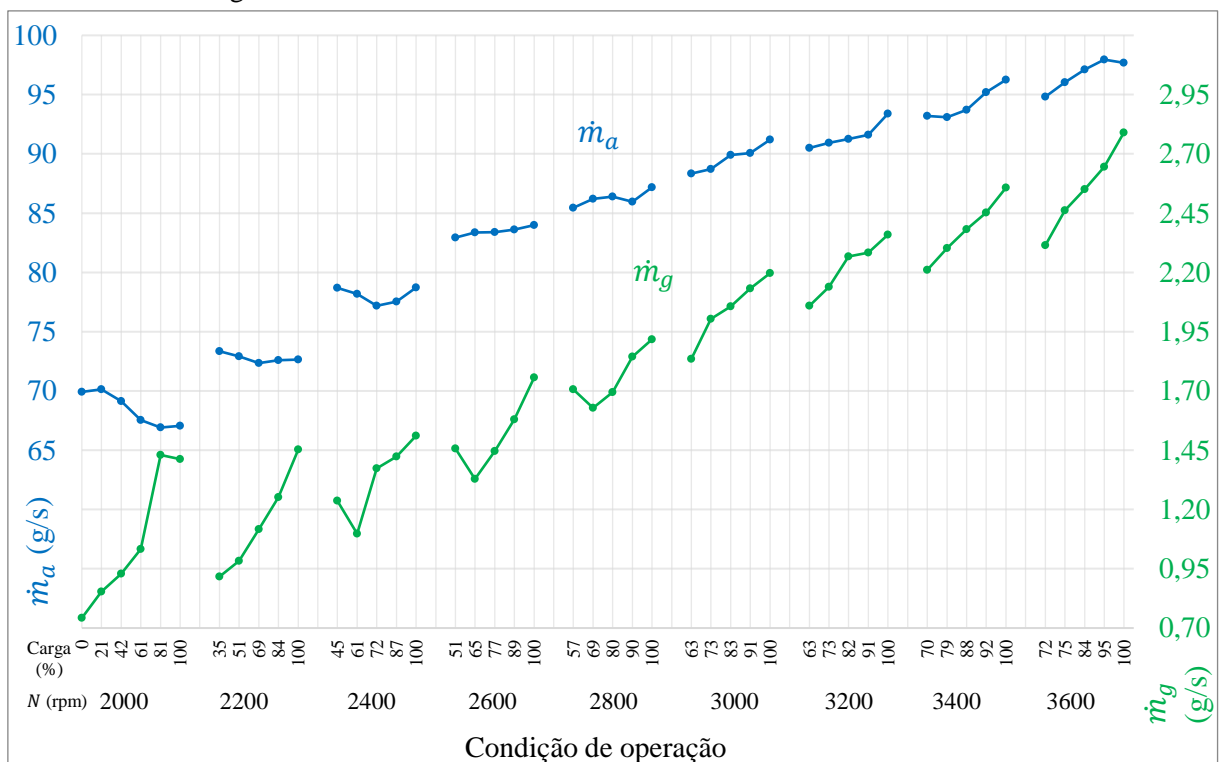
5.1.2 Vazões mássicas dos fluxos de ar e água

Na Tabela 40 APÊNDICE E são mostrados os registros de fluxos de água (\dot{m}_w), ar de admissão (\dot{m}_g) e ar de arrefecimento (\dot{m}_a). A abertura da válvula de controle do fluxo \dot{m}_w foi

mantida constante durante todo o ensaio do mCHP-Ex, sendo assim, ocorreram apenas pequenas variações na vazão mássica, ficando entre $34,24 \text{ g/s} \pm 1,71 \text{ g/s}$ e $34,81 \text{ g/s} \pm 1,74 \text{ g/s}$.

No gráfico da Figura 38 foram plotadas as curvas de vazões mássicas do ar de admissão e ar de arrefecimento. A vazão mássica \dot{m}_a variou de $66,92 \text{ g/s} \pm 2,01 \text{ g/s}$ a $97,95 \text{ g/s} \pm 2,94 \text{ g/s}$. O valor sofre alteração tanto pela variação da frequência de rotação, quanto da carga. Falta de regularidade proporcional foram notadas nas curvas de 2000 rpm e 2400 rpm, onde os valores de fluxo sofreram alguma redução com aumento da carga. Estas variações podem ter ocorrido por oscilações na tensão de alimentação do eletro ventilador.

Figura 38 – Vazões mássicas do ar de admissão e ar de arrefecimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

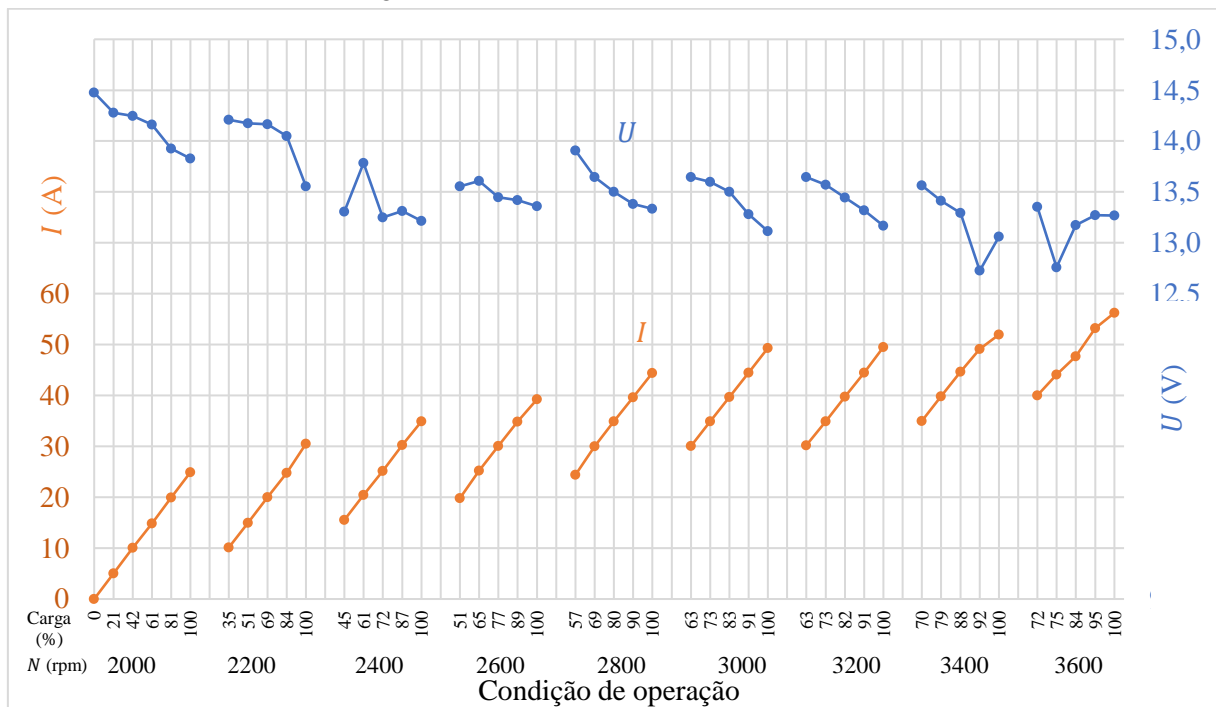
A vazão mássica \dot{m}_g mínima foi de $0,742 \text{ g/s} \pm 0,022 \text{ g/s}$ e a máxima de $2,790 \text{ g/s} \pm 0,092 \text{ g/s}$. Ocorreram comportamentos atípicos revelados por valores menores de \dot{m}_g nas condições de carga entre 61% e 69% nas frequências de rotação entre 2400 rpm e 2800 rpm. Uma possível explicação é a ocorrência de ciclos de abertura e fechamento da borboleta do carburador ocasionado pelo sistema de controle de frequência de rotação do motor.

5.1.3 Variação da massa de combustível, tempo, tensão e corrente no alternador

O tempo (t) indica a duração em segundos do ensaio em cada condição de operação. A variação da massa de combustível (m_f) representa a massa de combustível consumida pelo mCHP-Ex na respectiva condição de operação. O menor consumo de combustível foi de $26,67 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ e o maior consumo foi de $103,9 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$. Na Tabela 41 do APÊNDICE E constam as variáveis m_f e t , juntamente com os registros de tensão e corrente no alternador para cada condição de operação.

O alternador opera com tensão nominal de 14 V , porém, em condições de maior carga, a tensão pode ser um pouco menor. A tensão (U) variou de $12,73 \text{ V} \pm 0,25 \text{ V}$ a $14,48 \text{ V} \pm 0,29 \text{ V}$. A corrente (I) no alternador indica a intensidade de carga imposta ao mCHP-Ex e apresentou variação entre $0 \text{ A} \pm 0,01 \text{ A}$ e $56,24 \text{ A} \pm 0,29 \text{ A}$. Na Figura 39 aparece um gráfico com as curvas de tensão e corrente no alternador.

Figura 39 – Tensão e corrente no alternador



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

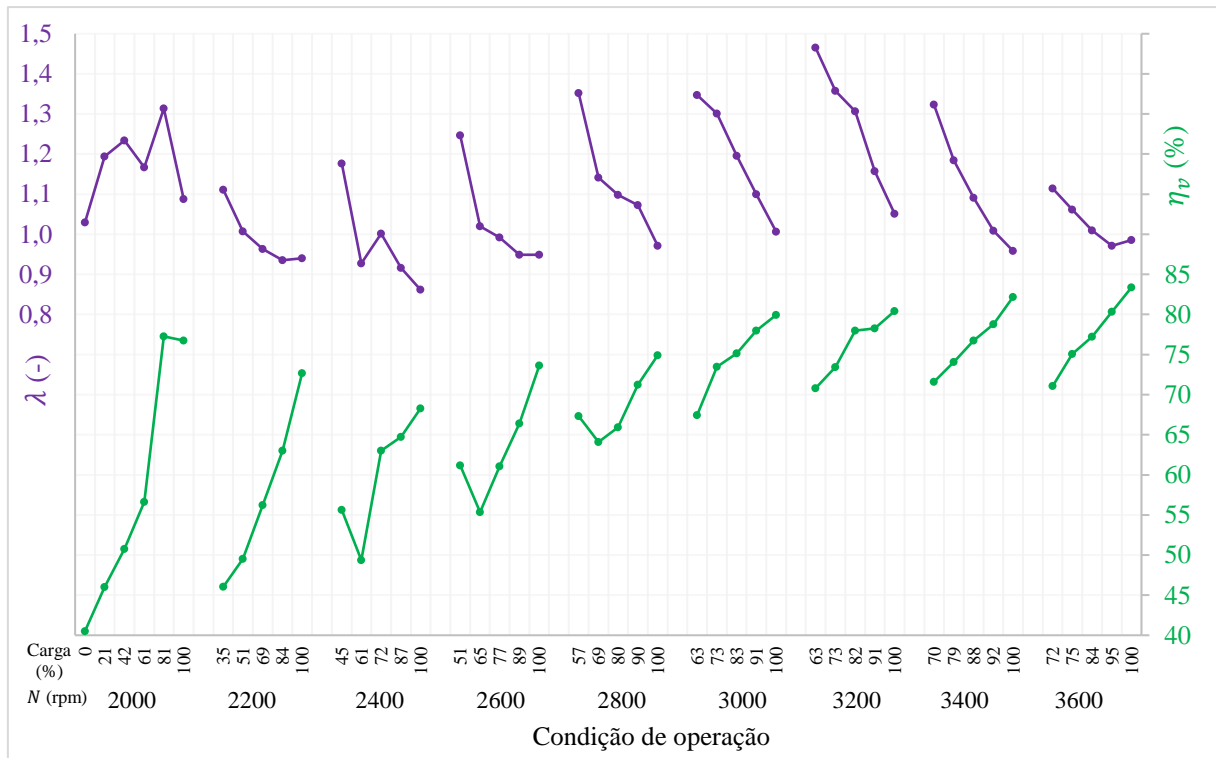
5.1.4 Dados secundários

Com os dados das medições primárias foi possível calcular a taxa de consumo de combustível (\dot{m}_f), além de informações adicionais, como a eficiência volumétrica (η_v), relação ar combustível (A/F) e coeficiente teórico de excesso de ar (λ). A Tabela 42 do APÊNDICE E

mostra estes dados acompanhados de suas respectivas incertezas. A \dot{m}_f mínima ocorreu com 2026 rpm e 21% de carga, e seu valor foi de $0,0544 \text{ g/s} \pm 0,0001 \text{ g/s}$ e o valor máximo foi de $0,2155 \text{ g/s} \pm 0,0005 \text{ g/s}$ a 3637 rpm em plena carga.

Os valores de λ foram calculados pela relação entre o A/F oriundo das medições e o A/F teórico da gasolina comercial com 26% de etanol anidro, que segundo Stärkx (2021), é de 13,13:1. No gráfico da Figura 40 a η_v e o fator λ estão relacionados com as condições de operação no ensaio do mCHP-Ex. Nota-se que o fator λ é mais alto nas condições de operação que combinam menor carga com frequência de rotação entre 2800 rpm e 3200 rpm, atingindo o valor máximo de $1,465 \pm 0,003$ a 3208 rpm com carga de 63%.

Figura 40 – Eficiência volumétrica e fator λ



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

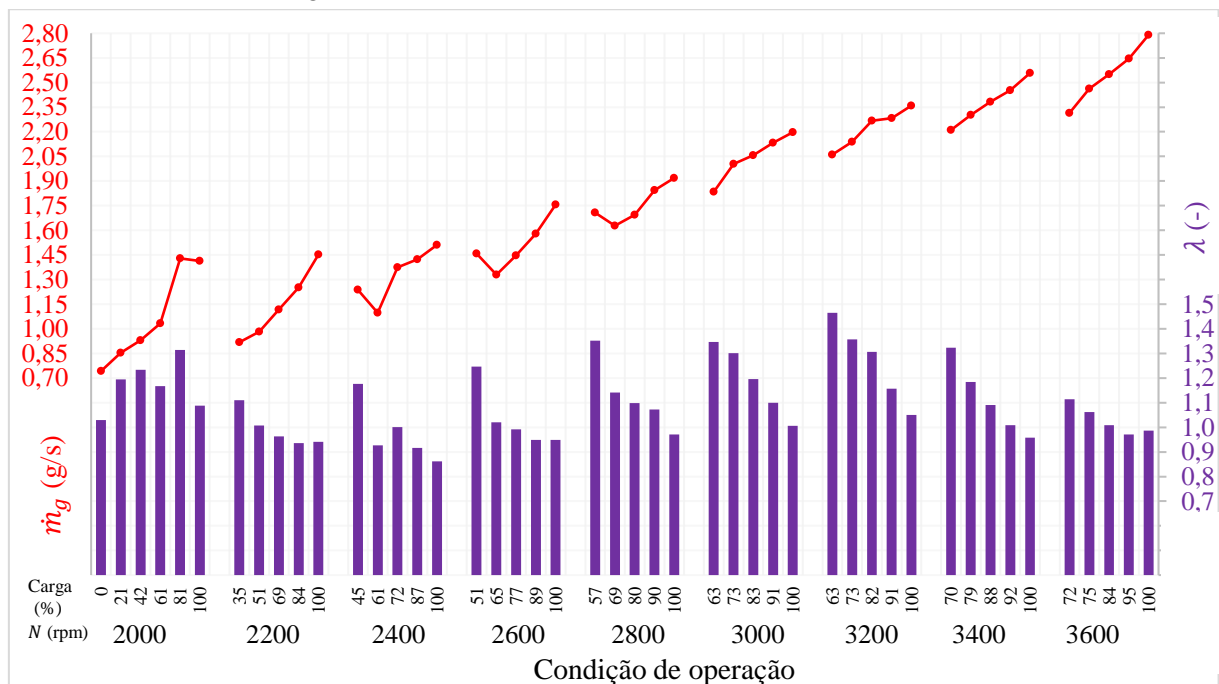
Nas curvas de 2000 rpm, 3000 rpm e 3200 rpm o fator λ está acima de 1 para qualquer condição de carga. O valor mais baixo ocorreu com 2436 rpm e carga máxima, onde o fator λ é igual a $0,862 \pm 0,004$. Como a alimentação de combustível do motor é por carburador, ao invés de injeção eletrônica, não há controle de fator λ nos gases de exaustão. A instalação de um sistema de injeção eletrônica de combustível poderia proporcionar melhor controle das curvas de fator λ .

A η_v a plena carga se mostra baixa na faixa de frequência de rotação de 2400 rpm. A curva de 2000 é a única em que a carga é variada deste a condição sem carga até a condição de

plena carga, e nesta faixa de frequência de rotação a η_v apresenta maior amplitude, indicando dependência direta da η_v com a intensidade de carga. Corrobora com este indicativo o fato das amplitudes de η_v serem menores nas faixas de frequência e rotação mais altas (3200 rpm, 3400 rpm e 3600 rpm), onde a amplitude de variação da carga é menor.

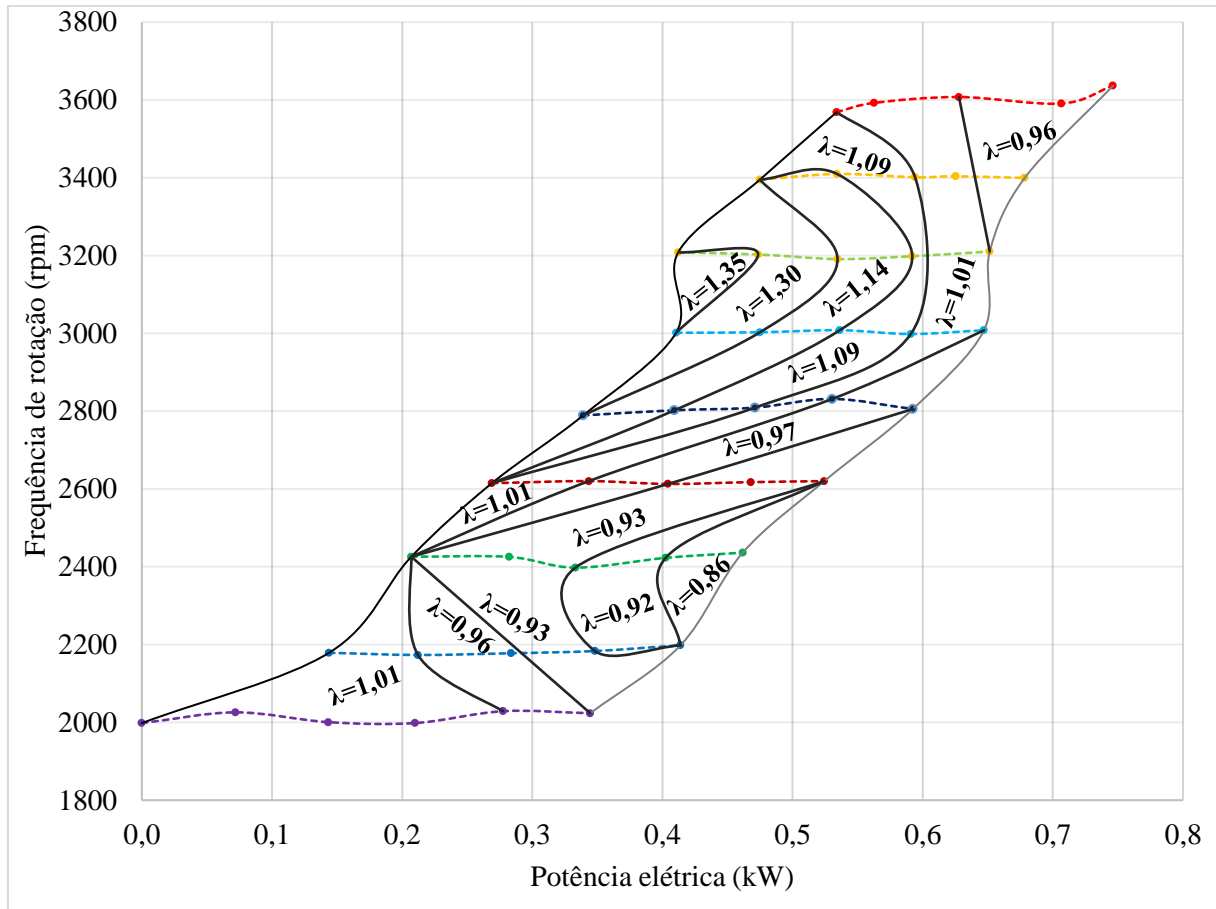
A Figura 41 apresenta um gráfico que relaciona os valores de λ e \dot{m}_g para cada faixa de frequência de rotação. Nota-se que, em geral, o valor do λ decresce com o aumento de fluxo de ar de admissão dentro de uma mesma faixa de frequência de rotação. Tal comportamento pode ser consequência de um melhor ajuste de mistura ar combustível em condições de maior abertura de borboleta, ou seja, quando o fluxo predominante de combustível ocorre pelo “circuito de alta” do carburador. Um provável motivo para as discrepâncias ocorridas com baixa carga nas curvas entre 2400 rpm e 2800 rpm seria a oscilação da abertura de borboleta ocasionada pelo sistema de controle de frequência de rotação do motor, causando variações no fator λ desproporcionais ao fluxo de ar de admissão. Outros estudos seriam necessários para investigar as reais causas do comportamento desrelacionado entre o fator λ e o \dot{m}_g para tais condições.

Figura 41 – Fator λ e a vazão mássica do ar de admissão



Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico da Figura 42 as linhas contínuas delimitam as ilhas onde o valor indicado é o mínimo valor de λ dentro da ilha. Os valores mais altos concentram-se entre 3000 rpm e 3200 rpm. Valores mais baixos distribuem-se próximos da linha de carga máxima, especialmente entre 2000 rpm e 2600 rpm.

Figura 42 – Regiões de λ em função de N e P_{el} 

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

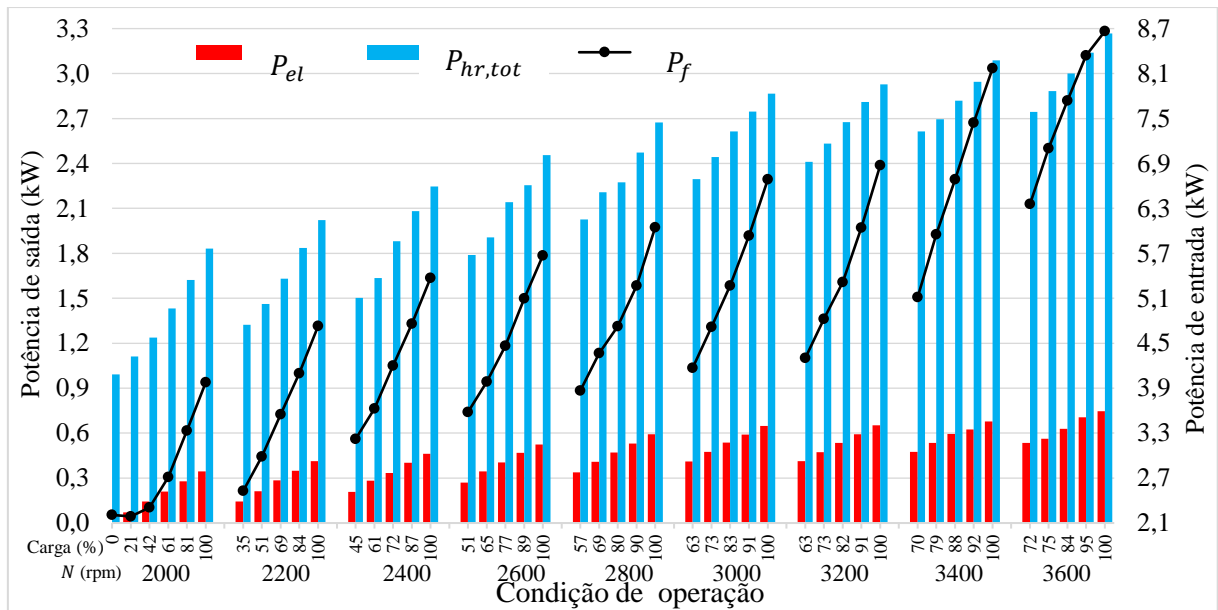
5.2 GRANDEZAS DE INTERESSE

As grandezas de interesse, citadas na Figura 34 do item 4.2.1, foram determinadas a partir dos registros das medições primárias vistos no Item 5.1.

5.2.1 Potências

Os registros da potência de entrada (P_f), e das potências de saída (P_{el} , $P_{hr,tot}$) constam na Tabela 43 do APÊNDICE E, e no gráfico da Figura 43 estão relacionadas com cada condição de operação. A P_f mínima foi de 2,188 kW \pm 0,005 kW, ocorrendo com 2026 rpm e 21% de carga, e a máxima foi de 8,665 kW \pm 0,018 kW, com 3637 rpm e 100% de carga. A P_{el} oscilou desde zero, com N igual a 1998 rpm, até o valor máximo de 0,746 kW \pm 0,015 kW, com N igual a 3637 rpm. Já a $P_{hr,tot}$ ficou entre 0,993 kW \pm 0,012 kW e 3,267 kW \pm 0,039 kW, respectivamente em 1998 rpm e 3637 rpm.

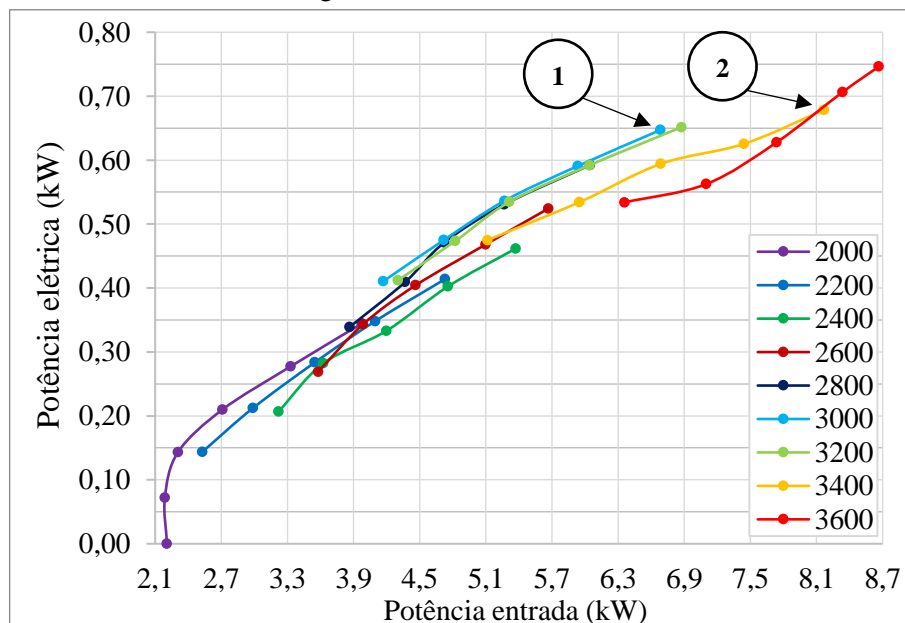
Figura 43 – Potências de entrada e saída do mCHP-Ex



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para melhor visualização dos dados as potências de saída são mostradas em dois gráficos separados. A P_{el} aparece na Figura 44, onde nota-se que a melhor faixa de operação do motor está entre 2800 rpm e 3200 rpm. A curva de 3000 rpm apresenta os maiores valores de P_{el} para o intervalo de P_f entre 4,170 kW \pm 0,009 kW e 6,685 kW \pm 0,014 kW. Para o fornecimento de P_{el} acima de 0,652 kW, é necessário passar para as faixas de rotação mais elevadas (3400 rpm e 3600 rpm). Entretanto, a elevação de apenas 5% na P_{el} (do ponto 1 para o ponto 2) implica no aumento na demanda de P_f em 22%.

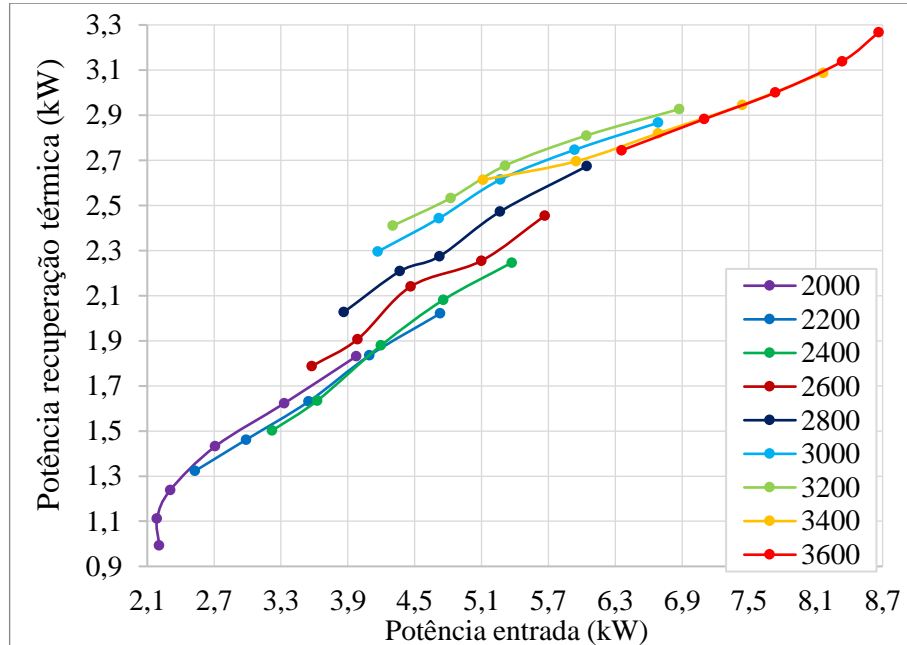
Figura 44 – Potência elétrica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 45 pode-se perceber que a faixa de N entre 3000 rpm e 3600 rpm se mostra mais favorável para as condições de alta demanda de $P_{hr,tot}$.

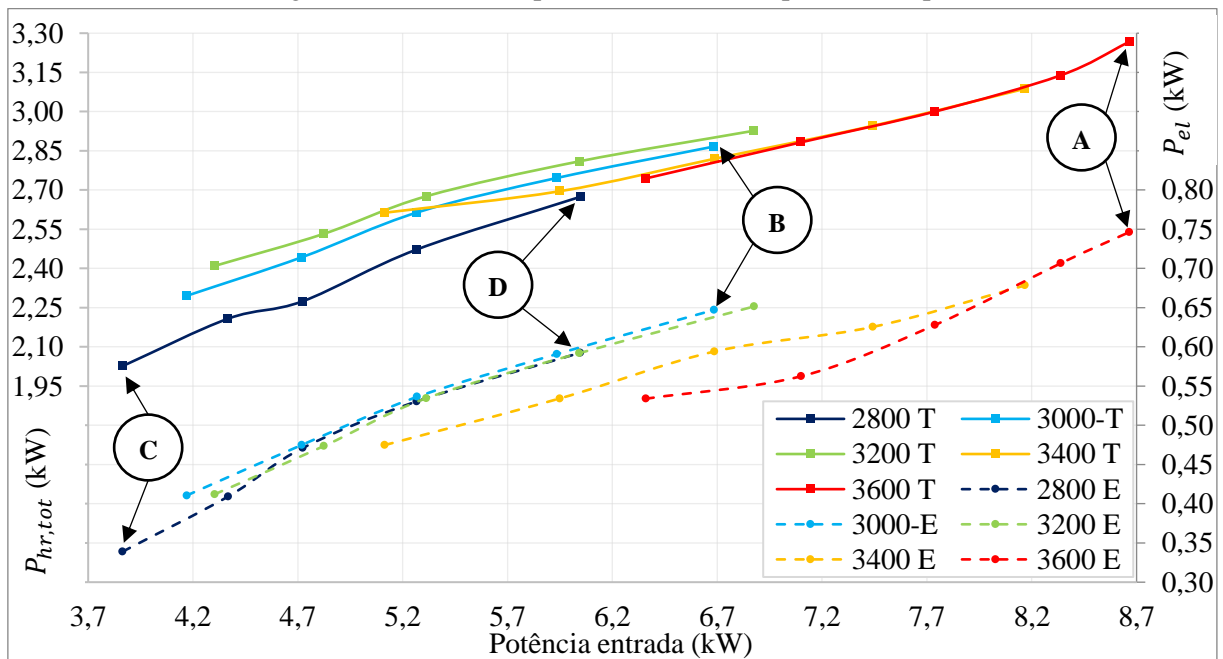
Figura 45 – Potência de recuperação térmica total



Fonte: Elaborado pelo autor.

O intervalo de N entre 2800 rpm e 3600 rpm aparece, em detalhe, na Figura 46. Na parte superior são as curvas relativas à $P_{hr,tot}$ e na parte inferior (linhas tracejadas) são as curvas relativas à P_{el} .

Figura 46 – Curvas de potência entre 2800 rpm e 3600 rpm



Fonte: Elaborado pelo autor.

Supondo uma situação em que o usuário do RV queira tomar banho e aproveitar para recarregar as baterias do veículo que estariam parcialmente descarregadas. Para isso, seria conveniente utilizar o mCHP-Ex na faixa de rotação de 3600 rpm. Assim, no ponto A, o equipamento forneceria $P_{hr,tot}$ máxima (3,267 kW \pm 0,039 kW) para reposição de água quente no reservatório. A P_{el} inicialmente também seria máxima (0,746 kW \pm 0,015 kW), pois as baterias parcialmente descarregadas estariam demandando corrente de carga máxima. Passados alguns minutos, a corrente tenderia a diminuir, pois as baterias estariam chegando próximo da carga completa. A $P_{hr,tot}$ também seria menor, porém, com a N fixada em 3600 rpm, ainda seria suficiente para aquecimento da água de reposição do reservatório.

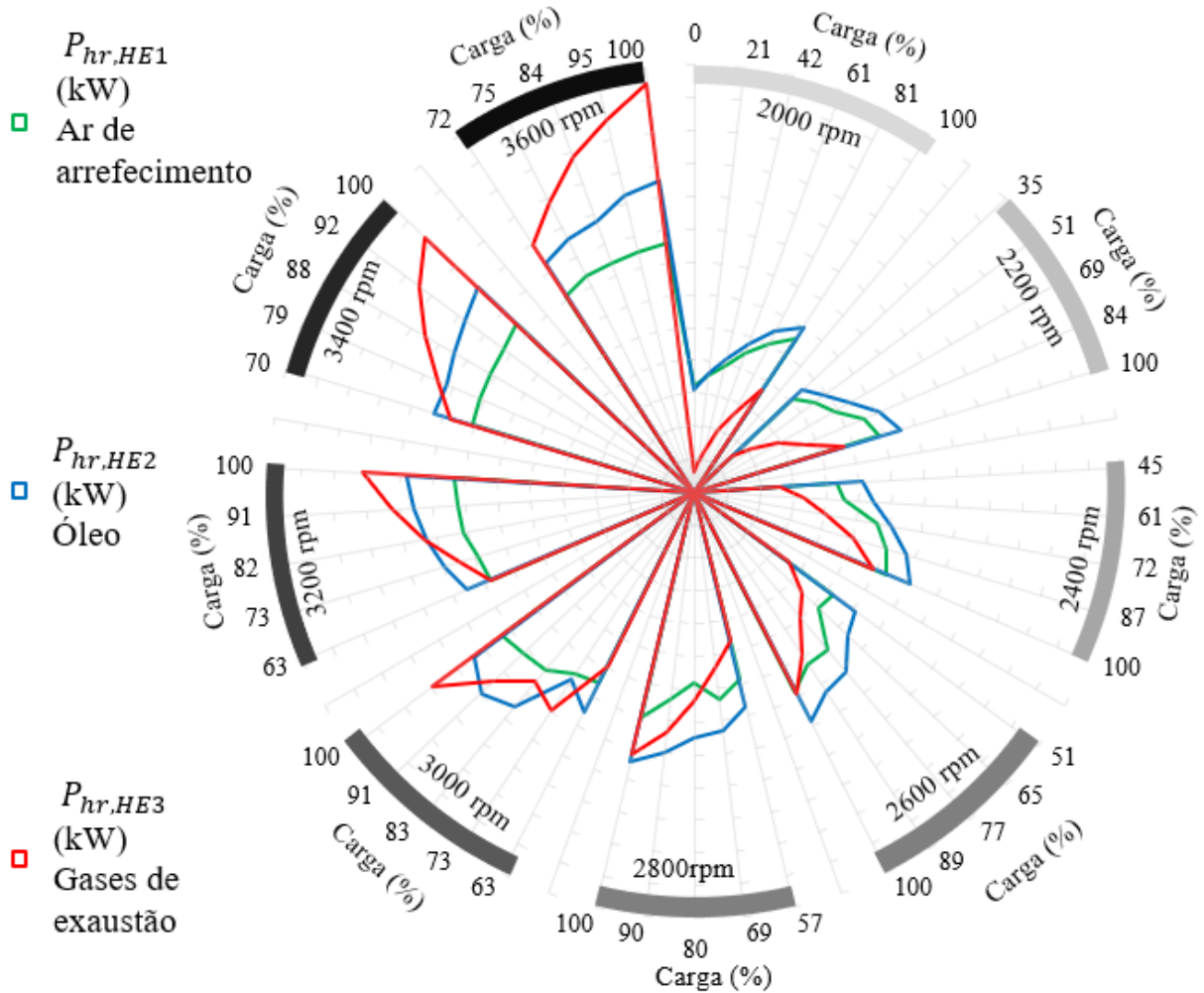
Caso a demanda principal seja recarga das baterias, porém sem necessidade de fornecimento de corrente máxima, a faixa de N igual a 3000 rpm seria mais favorável, pois, o mCHP-Ex poderia fornecer até 0,647 kW \pm 0,013 kW (ponto B) com consumo de potência de 6,685 kW \pm 0,014 kW. Nesta condição, ainda poderia ser recuperada a $P_{hr,tot}$ de 2,867 kW \pm 0,034 kW para aquecimento de água ou do ambiente.

Outro possível cenário de aplicação seria no caso de um dia nublado, pois, mesmo que o RV possua um suposto sistema de geração fotovoltaica com potência de 450 W como fonte principal de energia elétrica, como a incidência solar seria baixa, conseqüentemente a potência gerada também seria baixa e provavelmente não superando 200 W, já que, em consultas no site da Cresesb (2014) foi identificado que nos meses de inverno a geração de energia fotovoltaica pode reduzir para até 40% em relação aos meses de verão. Para suprir o fornecimento de potência elétrica, a operação do mCHP-Ex poderia ser feita na faixa de N igual a 2800 rpm. Com isso, o equipamento forneceria entre 0,339 kW \pm 0,007 kW e 0,592 kW \pm 0,012 kW (pontos C e D), ou seja, potência superior a da geração fotovoltaica. Se além de nublado o clima estivesse frio, a ponto de necessitar de aquecimento do ambiente interno do RV, a 2800 rpm o fornecimento de potência térmica situa-se entre 2,027 kW \pm 0,024 kW e 2,674 kW \pm 0,032 kW, valores semelhantes aos de um ar condicionado de 9000 BTU/h e até mesmo de alguns modelos de aquecedores a gás e a diesel vistos no Item 2.5.

Para visualizar a contribuição de cada parcela de potência de recuperação térmica, oriundas de cada um dos trocadores de calor ($P_{hr,HE1}$, $P_{hr,HE2}$ e $P_{hr,HE3}$), foi criado o gráfico radar que aparece na Figura 47, onde os contornos coloridos representam as magnitudes das potências de recuperação térmica. Nota-se que até 2600 rpm a $P_{hr,HE3}$, que equivale a potência térmica recuperada dos gases de exaustão, é menos expressiva do que as contribuições de $P_{hr,HE1}$ (ar de arrefecimento) e $P_{hr,HE2}$ (óleo lubrificante), haja vista que, por inspeção do

gráfico, o contorno em vermelho até 2600 rpm não ultrapassa os contornos em verde e azul. Entretanto, a partir de 3000 rpm a $P_{hr,HE-3}$ já supera as outras duas em algumas condições de carga e é significativamente maior com 3400 rpm e 3600 rpm. Em 3200 rpm o $P_{hr,HE3}$ é maior que $P_{hr,HE1}$ e $P_{hr,HE2}$ a partir de 82% de carga e em 3600 supera os demais para qualquer carga testada. $P_{hr,HE1}$ e $P_{hr,HE2}$ são maiores que $P_{hr,HE3}$ nas frequências de rotação de 2000 rpm, 2200 rpm, 2400 rpm e 2600 rpm. Em 2800 o $P_{hr,HE1}$ passa a ser o menor nas cargas de 80, 90 e 100%. Os dados registrados das potências parciais constam na Tabela 44 do APÊNDICE E.

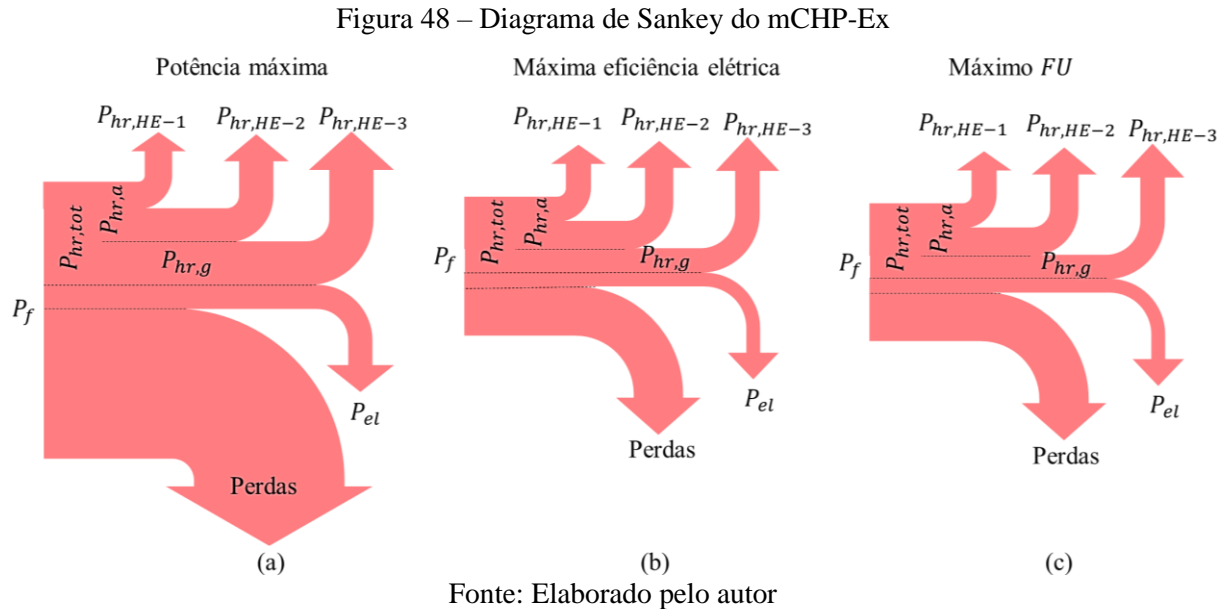
Figura 47 – Contribuição das parcelas de recuperação térmica de cada trocador de calor



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os registros indicam que a recuperação térmica do HE2 (óleo lubrificante) é maior do que do HE1 (ar de arrefecimento), porém, como o HE2 fica posicionado próximo ao motor e ao HE3, pode ser que a energia térmica desses componentes seja transferida para a água que circula em HE2, através das paredes de sua carcaça. Com isso, é mais adequado considerar a soma das potências recuperadas em HE1 e o HE2, que equivalem a $P_{hr,a}$.

Nos diagramas de Sankey da Figura 48 são ilustradas a entrada e as saídas de potência do mCHP-Ex simulando operação em (a) com potência máxima, em (b) no ponto de máxima eficiência elétrica, e em (c) no ponto de máximo FU . As espessuras das setas são mantidas em escala proporcional para facilitar a comparação visual.



Nota-se que, com potência máxima (a), condição que ocorreu com 3637 rpm e 100% de carga, as perdas são bastante expressivas pois representam mais da metade da entrada de energia. Passando para as condições de máxima eficiência elétrica (b) (ocorrida com 3008 rpm e carga de 83%) e máximo FU (c) (ocorrida com 3208 rpm com 63% de carga), as reduções nas parcelas de perdas são muito mais significativas do que as reduções nas saídas de potência útil. Estas evidências indicam não ser vantajoso do ponto de vista econômico a operação do mCHP-Ex em máxima potência. Em contrapartida, a operação mais eficiente ocorre com cargas parciais (entre 63% e 83%) e frequência de rotação entre aproximadamente 3000 e 3200 rpm.

5.2.2 Eficiências

A partir dos valores de potência são determinadas a eficiência elétrica (η_{el}), a eficiência de recuperação térmica ($\eta_{hr,tot}$), o fator de utilização (FU). Os registros desses dados constam na Tabela 45 do APÊNDICE E.

A η_{el} atingiu o valor máximo de $10,18\% \pm 0,20\%$, registrado com frequência de rotação de 3008 rpm e carga de 83%. As eficiências elétricas dos sistemas micro CHP comerciais vistos na RSL chegam a 31,1%. Comparando com os sistemas micro CHP experimentais que contam

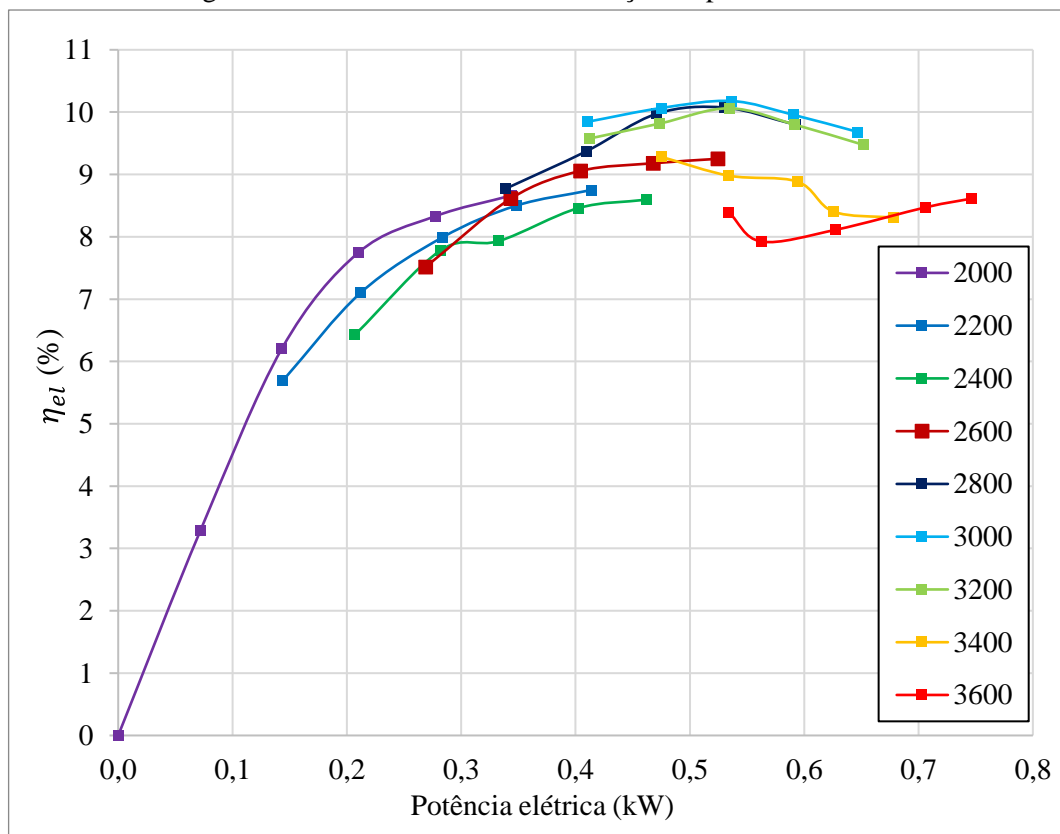
com sistema de arrefecimento a ar, avaliados por Possidente *et al.* (2006), a η_{el} ainda é muito inferior, haja vista que os números registrados pelos autores foram de 16,4% e 16,3%. Sistemas com arrefecimento líquido, mas de pequena potência elétrica, tem eficiências elétricas que não ultrapassam 20%, como é o caso dos valores registrados por Entchev, *et al.* (2013) e Bianchi, De Pascale e Melino (2013) para os sistemas micro CHP de até 1 kWe.

O baixo valor de η_{el} pode ser explicado pela baixa eficiência elétrica do alternador que, conforme visto no Item 2.2.1 é de aproximadamente 50 %.

Nos regimes com frequência de rotação entre 3000 rpm e 3200 rpm, a η_{el} não foi inferior a $9,48\% \pm 0,22\%$. Considerando somente as condições de plena carga para cada faixa de frequência de rotação, a η_{el} oscilou entre $8,31\% \pm 0,25\%$ (a 3400 rpm) e $9,80\% \pm 0,21\%$ (a 2805 rpm).

Na Figura 49 aparece o gráfico da η_{el} em função da P_{el} para cada faixa de frequência de rotação. Corroborando com as constatações da Figura 48, nota-se que as curvas de 3000 rpm e 3200 rpm são as mais eficientes eletricamente e, também que, desde que não haja necessidade de ultrapassar 0,652 kW de P_{el} , as curvas de 3400 rpm e 3600 rpm são dispensáveis, haja vista que são menos eficientes que as curvas de 3000 rpm e 3200 rpm.

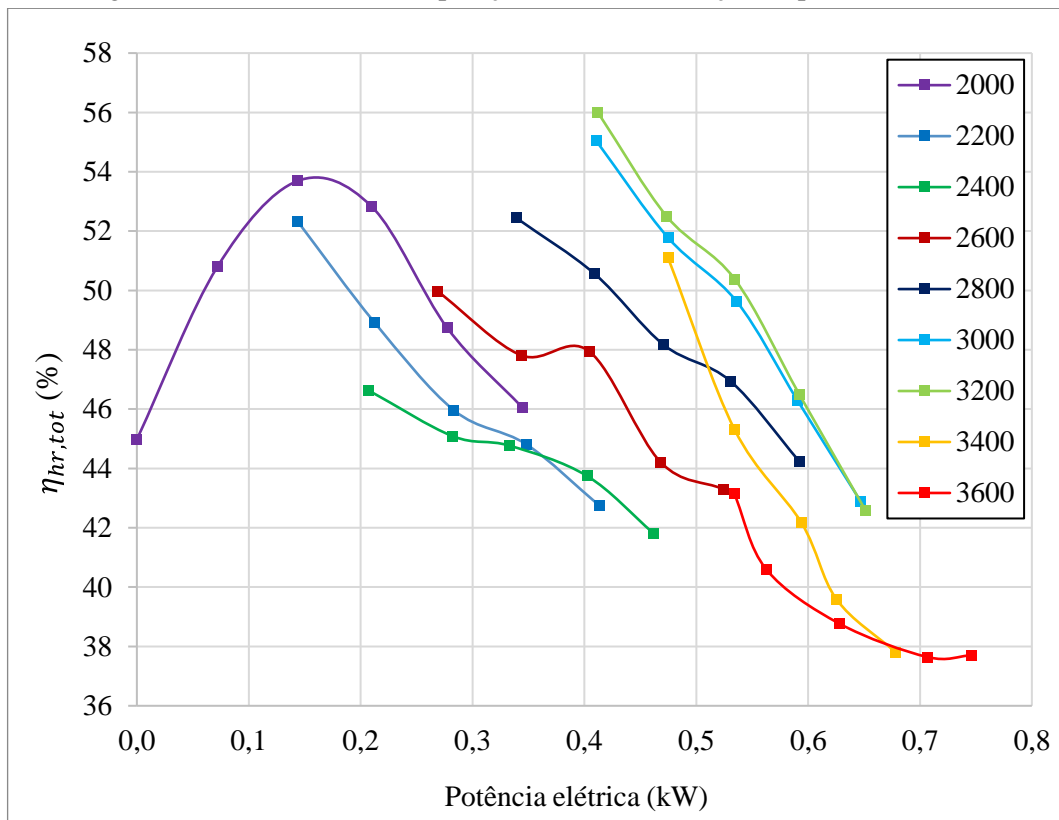
Figura 49 – Eficiência elétrica em função da potência elétrica



Fonte: Elaborado pelo autor

A $\eta_{hr,tot}$ atingiu $56\% \pm 0,02\%$ com 3208 rpm e 63% de carga. Considerando este valor máximo, mCHP-Ex se mostrou mais eficiente termicamente do que 37% dos sistemas micro CHP vistos na RSL com esses dados declarados. A $\eta_{hr,tot}$ do micro CHP comercial (com MCI) mais termicamente eficiente visto na RSL chega a 74%, trata-se do *Senertec Dachs G5.0 Kondenser*, citado por Bianchi, De Pascale e Melino (2013). Já entre os mCHP experimentais a $\eta_{hr,tot}$ varia entre 38,8% e 67,3%. A Figura 50 ilustra as curvas de $\eta_{hr,tot}$ em função da P_{el} para cada faixa de frequência de rotação.

Figura 50 – Eficiência de recuperação térmica em função da potência elétrica



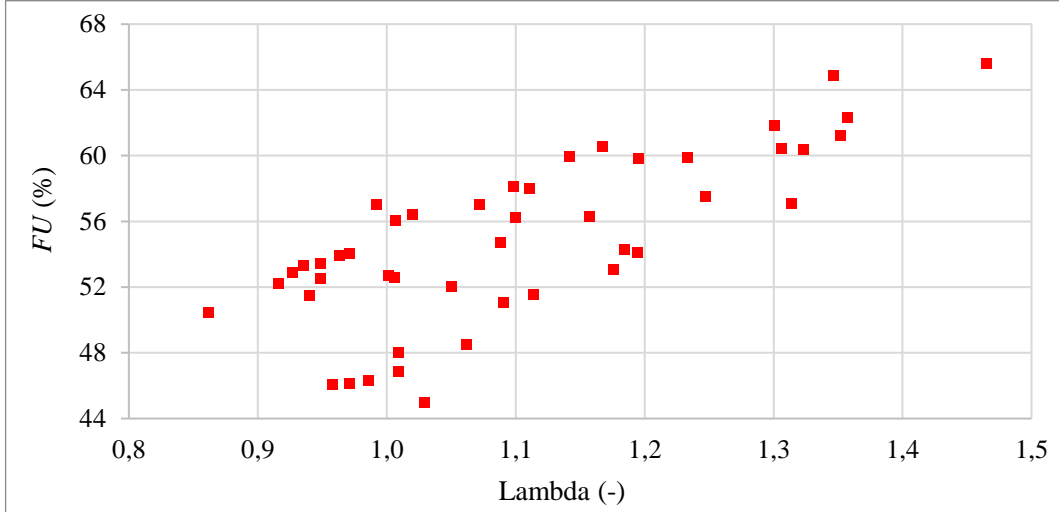
Fonte: Elaborado pelo autor

As curvas de 3000 rpm e 3200 rpm novamente despontam como as mais favoráveis. As suas vizinhas, 2800 rpm e 3400 rpm também apresentam maiores valores de $\eta_{hr,tot}$ quando comparadas às demais. As curvas de 2200 rpm e 2400 rpm, podem ser consideradas desnecessárias, haja vista que não superam a $\eta_{hr,tot}$ de qualquer outra curva. Como o FU é a soma de η_{el} e $\eta_{hr,tot}$ é natural que a $\eta_{hr,tot}$ apresente queda com o aumento da carga, haja vista que com maior demanda de potência elétrica a η_{el} aumenta.

O FU do mCHP-Ex atingiu o valor máximo de $65,57\% \pm 0,22\%$ na frequência de rotação de 3208 rpm com 63% de carga, ao passo que os valores vistos na RSL variam de 70% a 100%, para os dispositivos comerciais e de 55,1% a 91% para os dispositivos experimentais.

Pela dispersão dos pontos do gráfico da Figura 51, nota-se que os valores de FU tendem a ser mais altos quando o λ também é mais elevado.

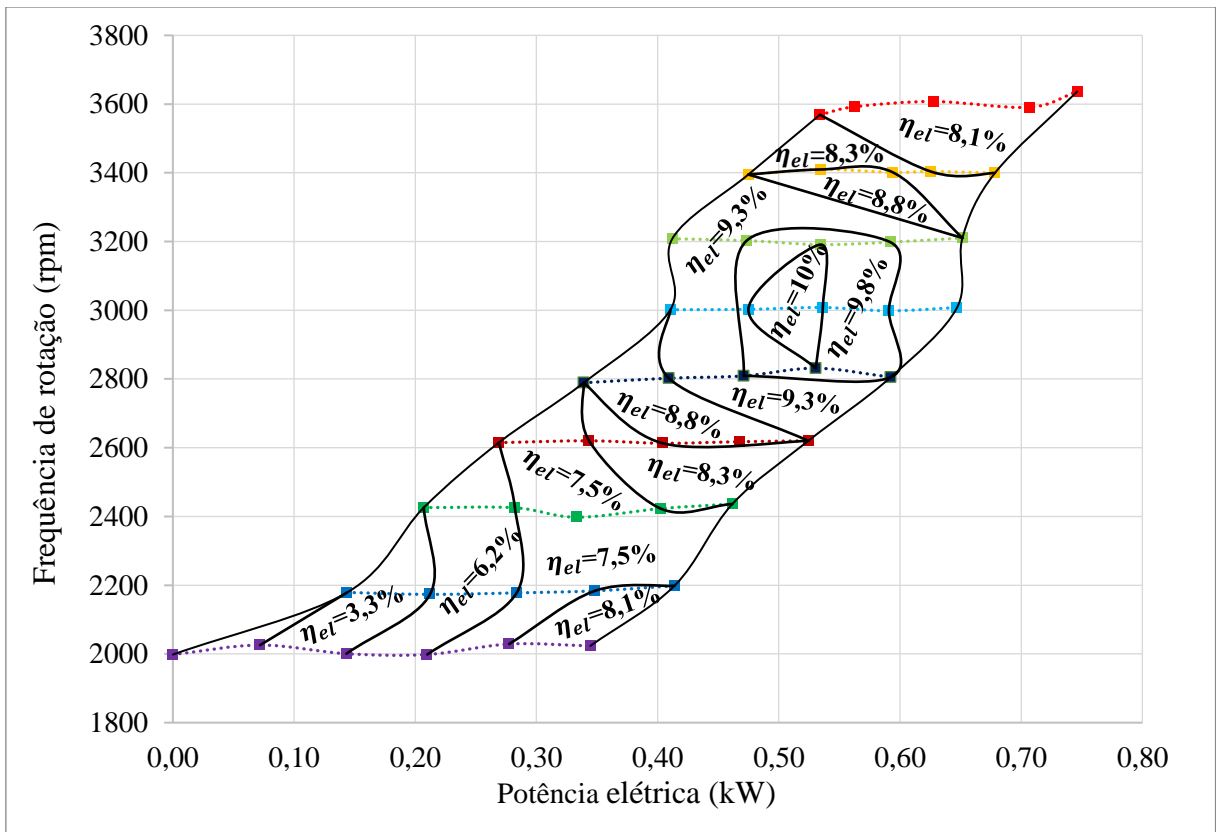
Figura 51 – Fator de utilização em função do fator Lambda



Fonte: Elaborado pelo autor

Para facilitar a identificação dos melhores modos de operação do mCHP-Ex, na Figura 52 é mostrado o seu mapa de desempenho do mCHP-Ex com as linhas de N e as ilhas de η_{el} .

Figura 52 – Mapa de desempenho do mCHP-Ex (η_{el})

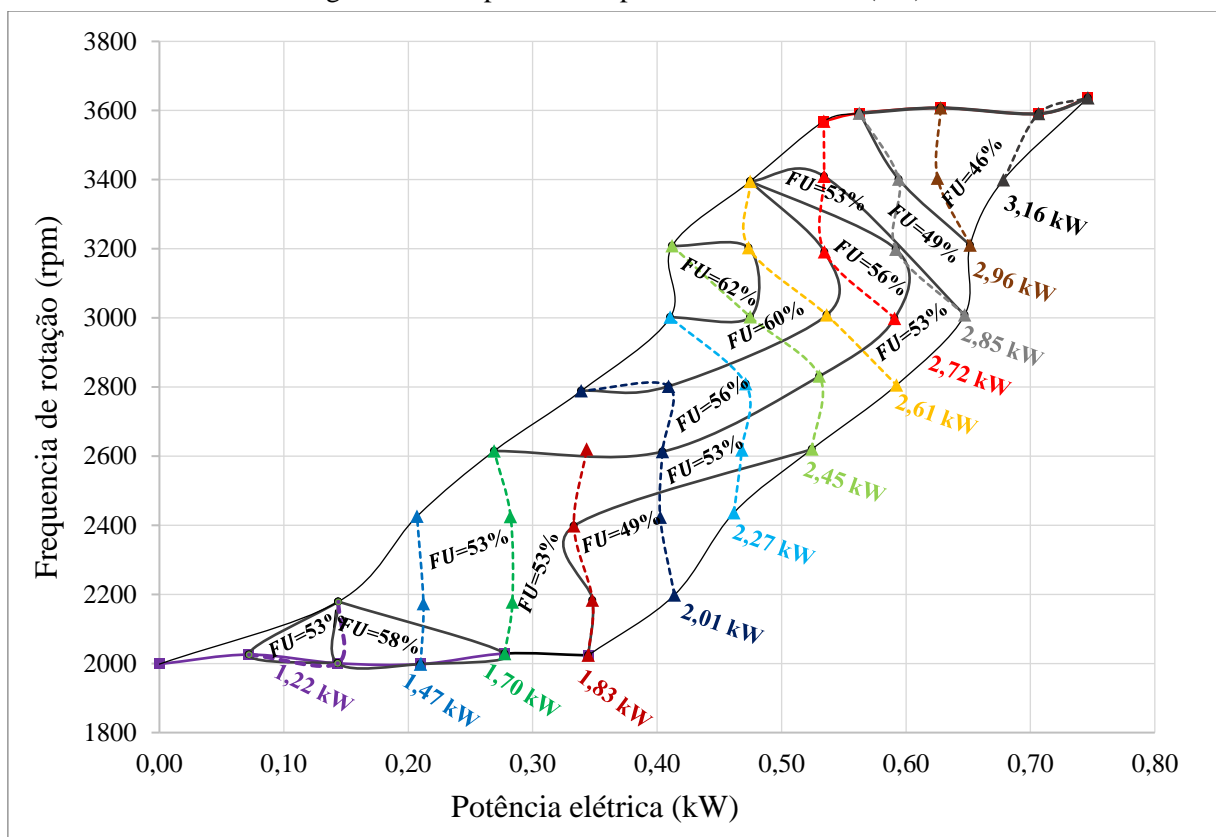


Fonte: Elaborado pelo autor

Dentro das regiões delimitadas pelas linhas contínuas, a η_{el} é igual ou maior do que a identificação da ilha. Nota-se a região de $\eta_{el} \geq 10\%$ no intervalo de P_{el} entre 0,475 kW e 0,535 kW combinado com o intervalo de N entre 2831 rpm e 3191 rpm.

Na Figura 53 o mapa de desempenho aparece com as linhas de $P_{hr,tot}$ e as ilhas de FU . Por análise do gráfico, pode-se afirmar que se obtém $FU \geq 60\%$ desde que satisfeitas as seguintes condições: N entre 2789 rpm e 3191 rpm, P_{el} entre 0,339 kW e 0,535 kW, e $P_{hr,tot}$ entre 2,01 kW e 2,72 kW. Interessante observar que o FU se mantém acima de 50% numa ampla faixa de potência e rotação.

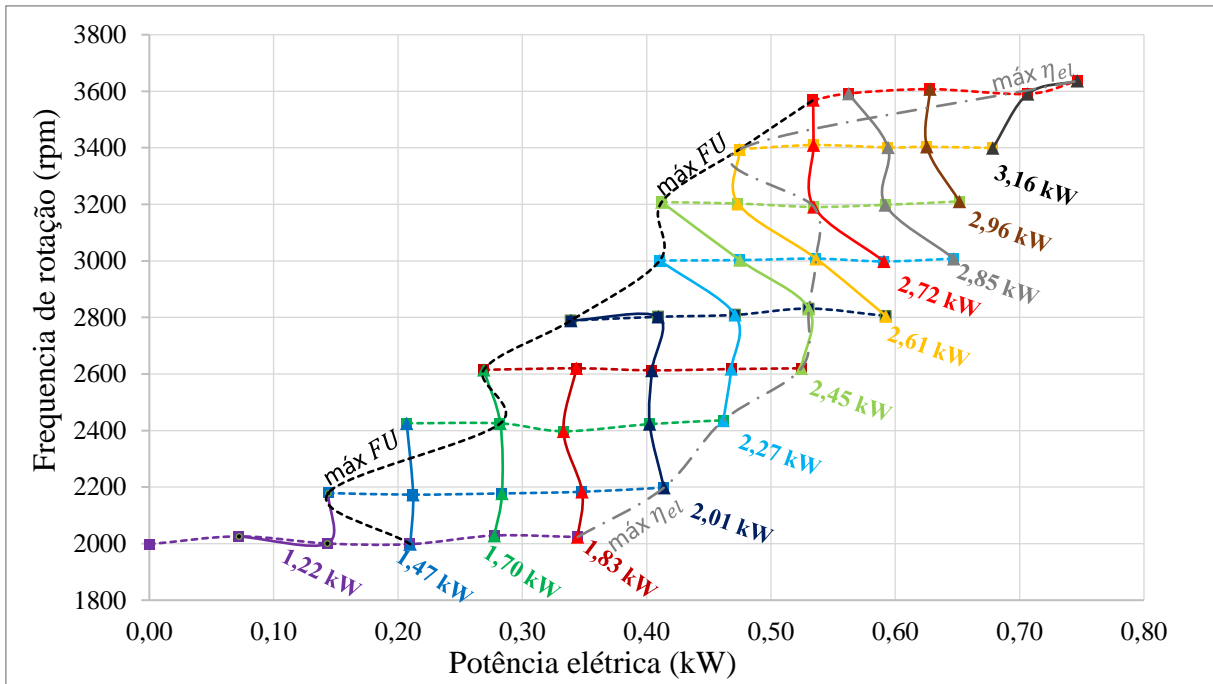
Figura 53 – Mapa de desempenho do mCHP-Ex (FU)



Fonte: Elaborado pelo autor

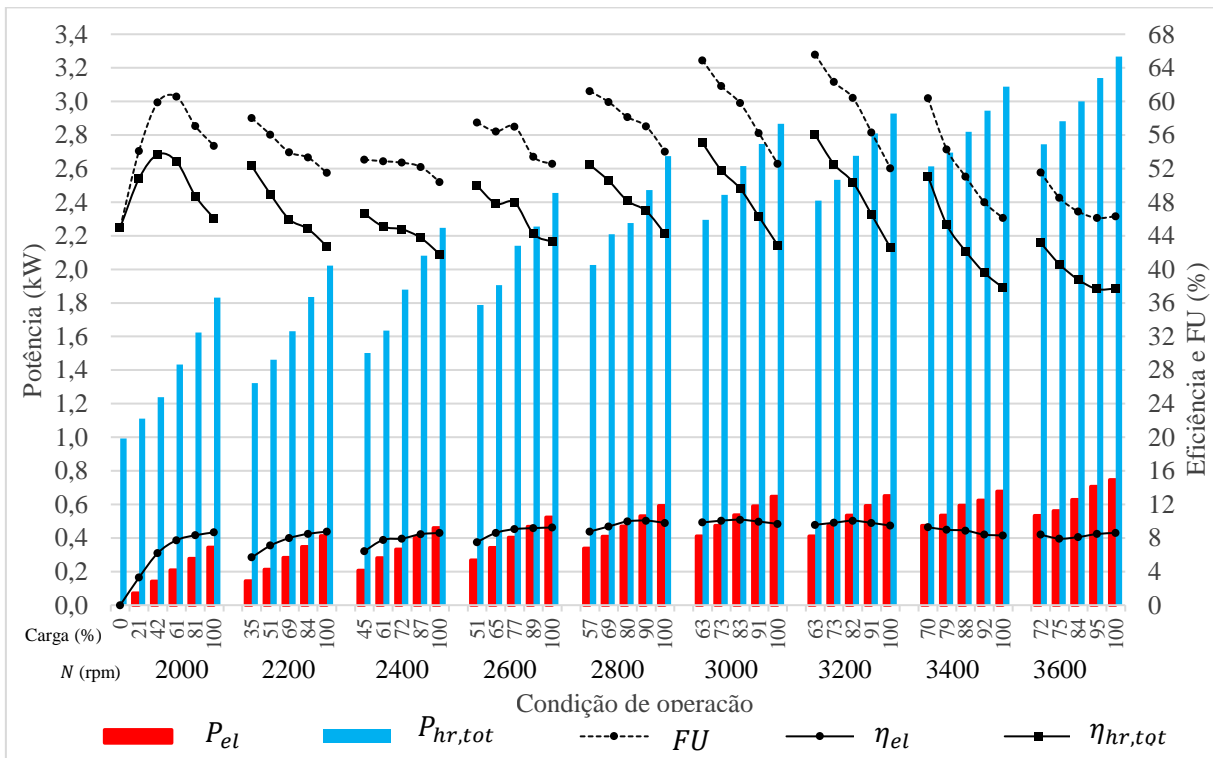
Na Figura 54 é mostrado outro mapa de desempenho com as linhas de máxima η_{el} e máximo FU . A η_{el} é máxima com a máxima P_{el} desde 2023 rpm até 2620 rpm e a partir de $N=2831$ rpm passa a ser máxima numa estreita faixa de P_{el} entre 0,530 e 0,536 kW, até $N=3191$ rpm. O FU é predominantemente máximo com a menor carga de cada faixa de N , o que indica que com cargas menores do que as cargas definidas para N entre 2600 rpm e 3600 rpm, o FU poderia ser ainda maior.

Figura 54 – Mapa de desempenho do mCHP-Ex (linhas de máxima η_{el} e máximo FU)



O gráfico da Figura 55 reúne todas as informações das potências de saída e eficiências avaliadas nos ensaios do mCHP-Ex.

Figura 55 – Potências e eficiências do mCHP-Ex



Na Tabela 23 o mCHP-Ex é comparado aos demais sistemas micro CHP experimentais de ciclo Otto com arrefecimento a ar vistos na RSL. Nota-se que o mCHP-Ex tem a menor η_{el} , porém é o segundo em $\eta_{hr,tot}$ e FU .

Tabela 23 – Comparativo dos mCHP experimentais de ciclo Otto com arrefecimento a ar

Equipamento	V_{dest} (cm ³)	N° cil (-)	$Comb$	P_f (kW)	P_{el} (kW)	$P_{hr,tot}$ (kW)	η_{el} (%)	$\eta_{hr,tot}$ (%)	FU (%)
Micro CHP E-1 Possidente, <i>et al.</i> (2006)	359	1	GN	18,3	3,00	10,5	16,4	57,4	73,8
Micro CHP E-2 Possidente, <i>et al.</i> (2006)	226	1	GN	10,2	1,67	4,0	16,3	38,8	55,1
Micro CHP E-5 Smith e Few (2001)	-	1	GN	6,53	0,98	2,89	15	44,3	59,3
mCHP-Ex	98	1	Gasolina	8,665	0,746	3,267	10,18	56,00	65,57

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 24 aparece o comparativo de dois sistemas hipotéticos com o mCHP-Ex operando no ponto de máxima η_{el} , conforme visto na Figura 48 (b). Um dos sistemas hipotéticos, com o objetivo de fornecer P_{el} e aquecimento do ambiente interno, seria composto por um moto-gerador Branco B4T 2000i em conjunto com um aquecedor de ambiente a diesel Espar Airtronic D2. O outro sistema hipotético forneceria P_{el} e potência térmica para aquecimento de água. Nesse caso, a suposta composição contaria com um aquecedor de água a GLP Lorenzetti LZ 750 BP GLP, além do moto-gerador Branco B4T 2000i. Para elaboração da tabela, foram considerados os dados de densidade e poder calorífico do diesel e do GLP, visto no Balanço Energético Nacional (2017) do Ministério de Minas de Energia.

Tabela 24 – Comparativo do mCHP-Ex com os sistemas hipotéticos compostos

Fornecimento	Equipamento	P_f (kW)	P_{el} (kW)	$P_{hr,tot}$ (kW)	P_{net} (kW)	η_{el} (%)	$\eta_{hr,tot}$ (%)	FU (%)	SFC_{tot} (g/MJ)	m (kg)
Aquecimento ambiente + P_{el}	Branco B4T 2000i	5,710	0,900	-	3,100	15,76	-	36,59	65,79	29,2
	Espar Airtronic D2	2,760	-	2,200		-	79,63			
-	mCHP-Ex	5,269	0,536	2,614	3,151	10,18	49,62	59,80	42,28	35,4
Aquecimento de água + P_{el}	Branco B4T 2000i	5,710	0,900	-	10,90	15,76	-	62,00	36,23	28,2
	LZ 750 BP GLP	11,75	-	10,00		-	85,00			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na comparação com o sistema hipotético formado por moto-gerador e aquecedor de ambiente a diesel, apesar de fornecer menos P_{el} , o mCHP-Ex forneceria maior potência líquida (P_{net}). Individualmente, a η_{el} e a $\eta_{hr,tot}$ são bem menores no mCHP-Ex, entretanto, a grande

vantagem do dispositivo combinado é o alto FU , que equivale a 1,63 vezes o FU da geração em separado.

Na comparação com o outro sistema hipotético, ou seja, moto-gerador/aquecedor de água a GLP, o mCHP-Ex não forneceria $P_{hr,tot}$ suficiente para se equivaler ao LZ 750 BP GLP, além de apresentar menor FU .

Um dado utilizado em sistemas de geração é o consumo específico de combustível (SFC_{tot}). A comparação realizada envolve três combustíveis diferentes, com PCI variando entre 40,2 kJ/g, para gasolina, e 46,48 kJ/g, para o GLP. Para o diesel, o PCI é o valor intermediário de 42,29 kJ/g. Em sendo valores de PCI muito próximos, não foi realizada equivalência dos valores destes. O sistema com moto-gerador/aquecedor de água a GLP apresentou o menor valor de SFC_{tot} (36,23 g/MJ). O mCHP-Ex tem SFC_{tot} 16,7% maior, ou seja, 42,28 g/MJ.

A massa do mCHP-Ex é de 35,4 kg, excede as massas das combinações de equipamentos de geração em separado. Porém, o protótipo desenvolvido possui praticamente metade da massa do micro CHP Honda dedicado ao mercado alemão, citado como mais leve na revisão de literatura, que possui massa de 68 kg.

5.2.3 Dados complementares

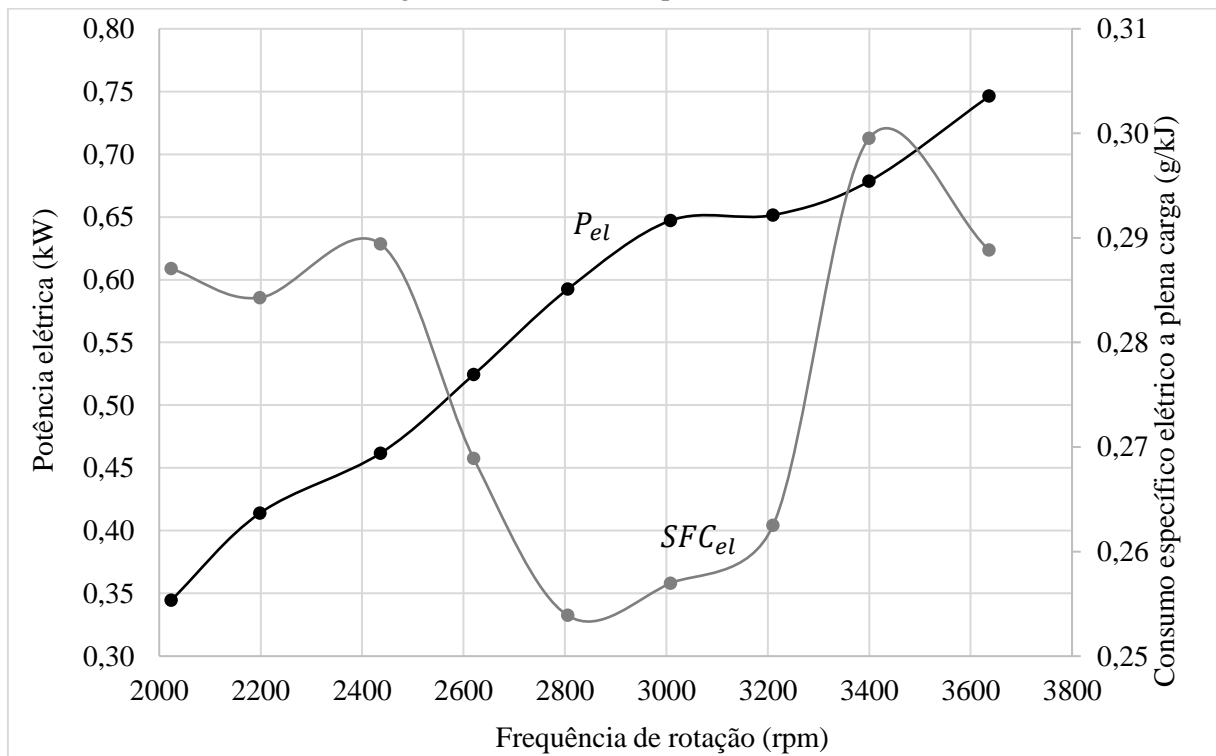
Outros dados relevantes para avaliação de desempenho do mCHP-Ex, sendo eles a relação $P_{el}/P_{hr,tot}$, e os consumos específicos elétrico (SFC_{el}) e total (SFC_{tot}), constam na Tabela 46 do APÊNDICE E.

A relação $P_{el}/P_{hr,tot}$ atingiu o máximo de 22,84% \pm 0,32%, com 3637 rpm e carga de 100%. Por se tratar de um moto-gerador CC de baixa tensão, são esperados altos valores de perdas por efeito joule, o que implica em baixas relações $P_{el}/P_{rt,total}$, haja vista que tais perdas diminuem a P_{el} e elevam a $P_{rt,total}$. A maioria dos estudos vistos na RSL tratam de moto-geradores CA que operam em tensão de distribuição (da ordem de uma a três centenas de volts), neste caso as perdas por efeito joule são menores. Porém, cita-se o estudo de Rey, *et al.* (2016), que foi realizado com moto-gerador de 24 V. Na sua pesquisa, os autores registraram uma relação $P_{el}/P_{rt,total}$ de 13%. No artigo, não é esclarecido se o moto-gerador é CC ou CA, mas acredita-se que se trata de um moto-gerador CC, pois é utilizado para recarga das baterias de uma embarcação recreativa.

O SFC_{el} indica a massa de combustível necessária para produção de uma determinada quantidade de energia elétrica. Nas especificações técnicas dos moto-geradores citados na Tabela 1 do Item 1 não constam dados de consumo específico, entretanto, pode-se estimar este dado a partir da informação de consumo a uma determinada potência. No caso do modelo B4T 2000i, o consumo é de 0,685 L/h a 50% de carga. Como a potência nominal do equipamento é de 1,8 kW, pode-se considerar o consumo específico em volume de 0,685 L/0,9 kWh. Levando em consideração que a densidade da gasolina é de 746,5 g/L, o consumo específico em massa é de 568 g/kWh, ou 0,158 g/kJ. No mCHP-Ex, o melhor valor de SFC_{el} ocorreu a 3008 rpm e carga de 83%, quando atingiu 0,244 g/kJ \pm 0,001 g/kJ, ou seja, aproximadamente 54,5% a mais de SFC_{el} do que o modelo B4T 2000i. Tal comparação indica que o mCHP-Ex é menos vantajoso para fornecimento exclusivo de energia elétrica.

Na Figura 56 aparece o gráfico com as curvas de P_{el} e SFC_{el} a plena carga em função de N . Ratificando o que já foi discutido em relação à η_{el} é possível perceber que o mCHP-Ex opera em condições mais satisfatórias na faixa de N entre 2800 rpm e 3200 rpm.

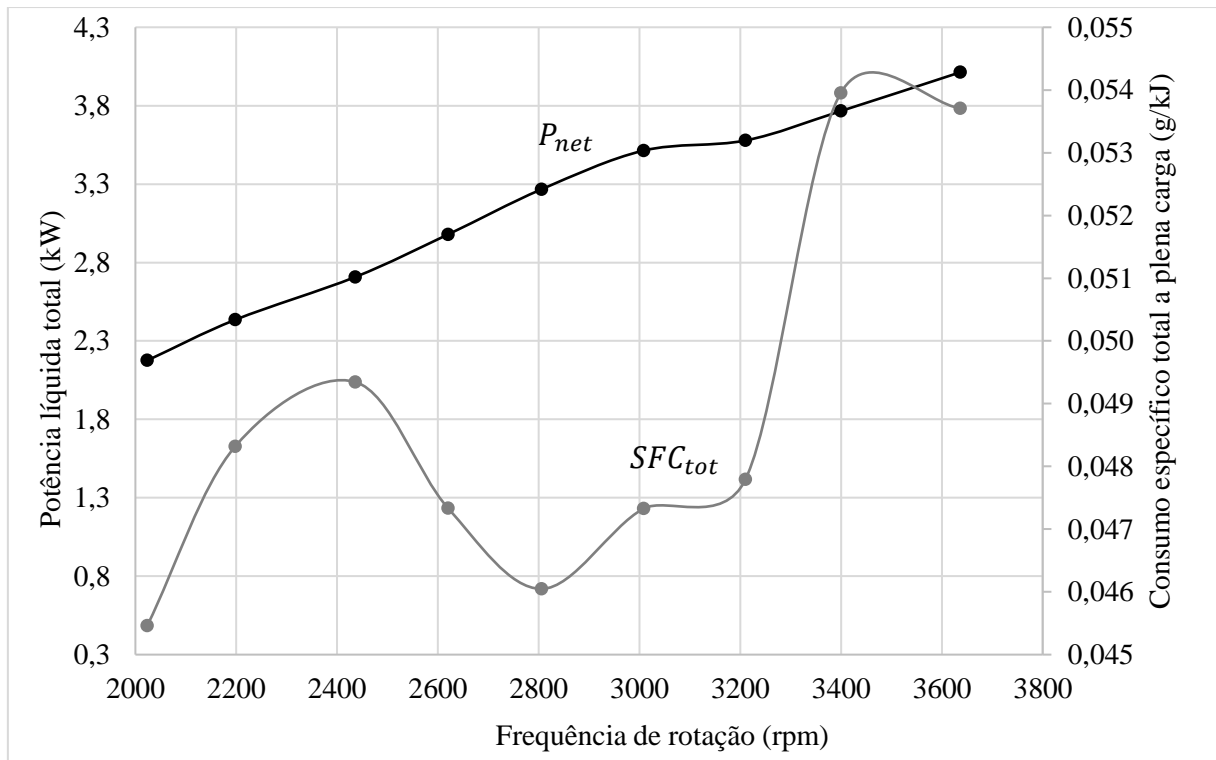
Figura 56 – Consumo específico elétrico



Fonte: Elaborado pelo autor

No gráfico da Figura 57 aparece, em função de N , a curva de SFC_{tot} a plena carga, juntamente com a curva de P_{net} .

Figura 57 – Consumo específico total



Fonte: Elaborado pelo autor

O melhor registro de SFC_{tot} foi $0,038 \text{ g/kJ} \pm 0,006 \text{ g/kJ}$ a 3208 rpm e carga de 63%. Entretanto, incerteza relativa desta medição pode ser considerada elevada, pois representa $\pm 15,34\%$ do valor medido.

5.2.4 Estimativas das perdas nos fluxos de ar e gases de exaustão

Para as potências perdidas nos fluxos de ar de arrefecimento ($P_{tl,a}$) e gases de exaustão ($P_{tl,g}$), bem como a soma dessas duas parcelas ($P_{tl,tot}$), foram feitas estimativas considerando aproveitamento térmico limite. Como se fosse toda a potência térmica destes fluxos aproveitada para aquecimento da água.

Estas estimativas são, na prática, inatingíveis, uma vez que não seria possível que os gases de exaustão saíssem do sistema a uma temperatura menor que a água que entra no HE-3. Todavia, servem para indicar a relação das perdas com as diversas condições de operação do mCHP-Ex. Os dados constam na Tabela 47 do APÊNDICE E acompanhados das relações entre as perdas de cada fluxo e o total de perdas ($P_{tl,a}/P_{tl,tot}$ e $P_{tl,g}/P_{tl,tot}$), as relações entre as perdas por fluxo e a recuperação térmica no fluxo ($P_{tl,a}/P_{hr,a}$ e $P_{tl,g}/P_{hr,g}$), e o total de perdas em relação ao total de recuperação térmica ($P_{tl,tot}/P_{hr,tot}$). Como são apenas estimativas não foram verificados valores de incerteza.

Embora a temperatura T_{g3} seja muito mais alta do que a T_{a3} , a $P_{tl,a}$ é maior que $P_{tl,g}$, para qualquer condição de operação. A contribuição da $P_{tl,a}$ para a $P_{tl,tot}$ varia entre 89,2% e 98,7%. Logicamente, a contribuição da $P_{tl,g}$ para o total varia de 1,3% a 10,8%. O valor absoluto de $P_{tl,a}$ atinge o máximo de 1,636 kW, com 3591 rpm e 95% de carga. Já o valor máximo de $P_{tl,g}$ chega a 0,196 kW a 3637 rpm e 100% de carga. Provavelmente, as perdas no ar de arrefecimento são maiores, porque a vazão mássica deste fluxo é maior do que no fluxo de gases de exaustão.

Foi visto no gráfico da Figura 47 do Item 5.2.1 que a recuperação térmica dos gases de exaustão só supera a recuperação térmica do ar de arrefecimento a partir de 3000 rpm. Comparando com os valores das estimativas de perdas, que são maiores no ar de arrefecimento em frequências de rotação mais altas, pode se dizer que se essas perdas fossem diminuídas, provavelmente, a recuperação térmica dos gases de exaustão não superaria a recuperação térmica do ar de arrefecimento.

As relações entre as estimativas de perdas e os valores de recuperação térmica varia entre 4,0% e 14,5% para $P_{tl,g}/P_{hr,g}$, entre 56,3% e 96,0% para $P_{tl,a}/P_{hr,a}$, e entre 40,3% e 57,3% para $P_{tl,g}/P_{hr,g}$.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No início desta pesquisa foi realizada uma pesquisa prévia em bases de dados científicos e bancos de registros de patentes a respeito de dispositivos micro CHP dedicados a RVs. Apesar de haver algumas patentes sobre sistemas de cogeração para RVs, muitas são sobre sistemas de geração termoelétrica (*Peltier*) ou sistemas em que o calor residual do motor principal do veículo é aproveitado para atender as necessidades térmicas do RV. Foi encontrada apenas uma patente sobre aproveitamento de calor residual, de um moto-gerador independente, para utilização no RV. Quanto aos artigos científicos, são poucas publicações a respeito de sistemas micro CHP para RVs, foram citados alguns sobre FC, SE e MRC.

A partir desse embasamento prévio, foi conduzida uma RSL onde buscou-se trabalhos sobre dispositivos micro CHP com características que possibilitem sua utilização em RVs. Dentre os trabalhos avaliados, a maioria cita dispositivos comerciais, para aplicação residencial, com motores de até 3 cilindros, operando com NG e arrefecimento a água. Apenas alguns poucos artigos versam sobre dispositivos experimentais com arrefecimento a ar desenvolvidos especificamente para avaliações em laboratório.

Em geral os sistemas micro CHP identificados são de grandes dimensões e massas elevadas, sendo assim inviáveis para aplicação veicular. Alguns dispositivos comerciais de menor potência elétrica (até 3 kW) poderiam ser adaptados em RVs, porém mesmo sendo pequenos, suas massas ultrapassam o dobro da soma das massas dos equipamentos que substituiriam no veículo (gerador a combustão, aquecedor de água a GLP e aquecedor de ambiente a diesel ou GLP). Os dispositivos experimentais com arrefecimento a ar, derivados de pequenos moto-geradores, podem ser adequados para a finalidade, porém, os autores não relatam seus dados de massa.

Como não foram identificados dispositivos micro CHP que atendam aos requisitos necessários de um RV, e sendo esta, uma lacuna de pesquisa, foi proposto e desenvolvido um dispositivo micro CHP experimental pensado para utilização em RVs. O mCHP-Ex fornece energia elétrica para recarga de baterias, além de ter um circuito de aquecimento de água a partir da recuperação térmica do ar de arrefecimento, óleo lubrificante e gases de exaustão.

O protótipo foi avaliado em laboratório e resultados de potência elétrica, potência de recuperação térmica, eficiências e outros dados, foram comparados com os dispositivos mCHP vistos na RSL e equipamentos de geração de energia térmica e elétrica em separado, para RVs.

O dispositivo desenvolvido apresentou operação satisfatória e se manteve íntegro durante o longo ensaio experimental, que teve 46 diferentes modos de operação, onde foram

variados os valores de N e carga. A η_{el} atingiu o valor máximo de $10,18\% \pm 0,20\%$ e o FU chegou a $65,57\% \pm 0,22\%$. No intervalo combinado de N entre 2800 rpm e 3200 rpm e carga entre 57% e 73%, o FU manteve-se acima de $59,92\% \pm 0,22\%$. Já a η_{el} apresentou valores acima de $9,8\% \pm 0,21\%$ na combinação de N entre 2800 rpm e 3200 rpm e carga entre 73% e 91%

Em comparação aos dispositivos hipotéticos de geração de energia térmica e elétrica em separado, mCHP-Ex se mostrou mais vantajoso quando o objetivo é a geração de potência elétrica em consórcio com o aquecimento de ambiente frente à combinação de um moto-gerador *inverter* com um aquecedor a diesel. Já, para a geração de energia elétrica em conjunto com o aquecimento de água, o dispositivo desenvolvido neste trabalho se mostra menos vantajoso do que as atuais formas de fornecimento em separado, sendo um moto-gerador *inverter* e um aquecedor de água a GLP.

O dispositivo experimental tem massa cerca de 23% maior do que as combinações hipotéticas de geração em separado. Por outro lado, comparado aos sistemas micro CHP comerciais, o mCHP-Ex pode ser até 48% mais leve, indicando que a concepção de um dispositivo dedicado a RVs é uma alternativa mais atrativa do que adaptar um dispositivo comercial residencial para utilização em RVs.

Apesar de não ser interessante para o fornecimento exclusivo de P_{el} , já que apresenta η_{el} menor do que de um moto-gerador *inverter*, mCHP-Ex pode ser uma alternativa complementar ao fornecimento de energia fotovoltaico, que em dias nublados tem menor geração e não é capaz de fornecer energia no período noturno. Ressalta-se que, em sendo naturalmente necessário nestas condições, o mCHP-Ex pode fornecer potência térmica, o que não é possível como moto-gerador *inverter*.

Pode-se afirmar que o protótipo experimental desenvolvido é o ponto de partida para o desenvolvimento de um dispositivo para utilização aplicada em RVs. Algumas alterações podem ser realizadas, como melhoria do sistema de recuperação térmica, buscando aumento da $\eta_{hr,tot}$, e até mesmo utilização de um gerador sem escovas de ímã permanente, para melhorar a η_{el} .

As estimativas indicam que as perdas no fluxo de ar de arrefecimento sejam bastante elevadas, representando entre 56,3% e 96,0% da $P_{hr,a}$, o que implica num total de perda estimada variando entre 40,3% e 57,3% do valor de $P_{hr,tot}$. Portanto, é possível que a instalação de um trocador de calor HE-1 maior, melhore a recuperação térmica deste fluxo e consequentemente a $P_{hr,tot}$ e o FU .

Outra possibilidade de continuação do trabalho seria a avaliação do dispositivo com outros combustíveis, haja vista que o motor pode ser facilmente modificado para operar com etanol ou GLP.

As comparações realizadas com os equipamentos que o mCHP-Ex substituiria num RV (moto-gerador *inverter*, aquecedor de ambiente a diesel e aquecedor de água a GLP) foram feitas com dados teóricos desses equipamentos, logo, seria possível realizar experimentos práticos para verificar o desempenho real destes e assim refazer as comparações.

REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI, A. G. J.; SOUZA, A. R. D. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. 1ª. ed. Barueri - SP: Manole, 2008.
- ALIEXPRESS. **Aliexpress**, 2023. Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/>>. Acesso em: 7 Dezembro 2023.
- ALTEN. **ALTEN Energy Solutions USA Inc.**, 2020. Disponível em: <<https://www.altendc.com/>>. Acesso em: 13 Maio 2021.
- AN, S.; YIJIN, S. **Motor home power supply heating device**. CN111660764, 15 Setembro 2020.
- ANGRISANI, G. et al. Experimental results of a micro-trigeneration installation. **Applied Thermal Engineering**, 38, Maio 2012. 78-90.
- ANGRISANI, G.; ROSELLI, C.; SASSO, M. **Numerical analysis of a small scale polygeneration plant with a desiccant-based air handling unit**. International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Impact of Energy Systems. [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 157-164.
- APOLO TRAILER. **Apolo Trailer**, 2021. Disponível em: <<https://apolotrailer.com.br/trailers/>>. Acesso em: 19 Maio 2021.
- APPLIC GAZ AS. ES374067A1, 01 Dezembro 1971.
- ASHRAE. **ASHRAE Handbook-HVAC Systems and Equipment**. [S.l.]: [s.n.], 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Guia para Expressão da Incerteza de Medição**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT-INMETRO, 2003.
- ATAULO, R. Curiosidades sobre o funcionamento da energia elétrica nos trailers. **Bora pro Camping**, 2016. Disponível em: <<http://www.boraprocamping.com/2016/11/curiosidades-sobre-o-funcionamento-da.html>>. Acesso em: 18 Maio 2021.
- AUTOTERM. Autoterm Air 2D. **Autoterm air and liquid heaters**, 2022. Disponível em: <<https://autoterm.com/overview/autoterm-air-2d>>. Acesso em: 19 Setembro 2022.
- BERTHOLD, N. **Device for waterheating via engine heat**. DE000003440966, 15 Maio 1986.
- BIANCHI, M.; DE PASCALE, A.; MELINO, F. Performance analysis of an integrated CHP system with thermal and Electric Energy Storage for residential application. **Applied Energy**, 112, Dezembro 2013. 928-938.
- BLUE, K. Harnessing the Power of the Sun: An Introduction to RV Solar Power. **TOGO RV**, 2020. Disponível em: <<https://togorv.com/rv-living/introduction-rv-solar-power/>>. Acesso em: 26 Maio 2021.
- BOSCH. **Alternadores, Motores de Partida e Principais Componentes**. Campinas. 2015.
- BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. ISBN 85-212-0378-0.
- BRAGG, J. H. **Winnebago Combines Stirling Technology with Unique Motor Home Design**. National West Coast Meeting. San Diego: SAE Technical Paper. 1 Fevereiro 1978.
- BRANCO. **Branco Motores Ltda**, 2023. Disponível em: <https://www.branco.com.br/la/pt_br/catalogo-de-produtos/motores/b4t3_0h.html>. Acesso em: 18 Julho 2023.

- BRANCO MOTORES LTDA. **Branco**, 2021. Disponível em: <https://www.branco.com.br/la/pt_br/catalogo-de-produtos/geradores/inverter-b4t-2000i.html>. Acesso em: 29 Outubro 2021.
- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Blucher, v. 2, 2012. ISBN 978-85-212-0709-2.
- BUFFALO. **Buffalo motores e Acoplados**, 2017. Disponível em: <<https://www.buffalo.com.br/produto/286/bfg-2500-inverter-220v>>. Acesso em: 29 Outubro 2021.
- CALIGIURI, C. et al. Experimental Investigation and RSM Modeling of the Effects of Injection Timing on the Performance and NO_x Emissions of a Micro-Cogeneration Unit Fueled with Biodiesel Blends. **Energies**, 15, n. 10, 13 Maio 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en15103586>>.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7^a. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito**, 2014. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 30 Novembro 2023.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5^a. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- CHOI, K.-S. et al. **Performance evaluation of nexa fuel cell with atmospheric temperature and humidity data**. 24th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition 2009, EVS 24. [S.l.]: [s.n.]. 2009. p. 1232 - 1239.
- CURTIS, S. **Heating system for caravan or mobile home or skip or similar**. DE19707644A1, 27 Agosto 1998.
- DE PAEPE, M.; D'HERDT, P.; MERTENS, D. Micro-CHP systems for residential applications. **Energy Conversion and Management**, 47, Novembro 2006. 3435-3446.
- DECAI, C. **Comprehensive power supply system for motor home, and control method thereof**. CN113928249, 14 Janeiro 2022.
- DENTICE D'ACCADIA, M. et al. Micro-combined heat and power in residential and light commercial applications. **Applied Thermal Engineering**, Julio 2003. 1247 - 1259.
- DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- DUNDAS, S. What Is an RV? **Outdoorsy**, 4 Setembro 2020. Disponível em: <<https://www.outdoorsy.com/blog/what-is-an-rv>>. Acesso em: 5 Janeiro 2022.
- DYSON, R. W. **Terrestrial applications of extreme environment stirling space power systems**. 2012 IEEE Energytech. Cleveland: IEEE. 2012.
- EASY TRANSPORT. Easy Transport T39, 2022. Disponível em: <<https://easytransport.com.br/t-39/>>. Acesso em: 17 Setembro 2022.
- ELSEVIER B. V. Scopus, 2023. Disponível em: <<https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?curl=UEsDBBBQACAgIAFOEfFcAAAAAAAFAAAAc3RhcncRllsuK5FYMhp9mvGk6SDq6LrwIZAizCswbdNclNNR0D%2b0amOTp8zsdgi1TC%2bMPI44uv6SzvJxnurDXpaiMLhLDna7IJz09%2bfP1RHwd3t5f%2fnx5nd8vy4%2fbfbm9LPdpeT%2fNy7TMn7%2f89klSHhf5hR7>>. Acesso em: 28 Novembro 2023.

- ENERGYSAVE. RV solar panels: are they right for you? **Energysave**, 2020. Disponível em: <<https://news.energysave.com/rv-solar-panels/>>. Acesso em: 26 Maio 2021.
- ENGELHARDT, P. et al. Integrated fuel cell APU based on a compact steam reformer for diesel and a PEMFC. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 18, p. 13470-13477, Setembro 2012.
- ENGELHARDT, P. et al. Coupled operation of a diesel steam reformer and an LT- and HT-PEFC. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 31, p. 18146-18153, 22 Outubro 2014.
- ENTCHEV, E. et al. Application of hybrid micro-cogeneration system - Thermal and power energy solutions for Canadian residences. **Energy and Buildings**, 60, Maio 2013. 345-354.
- EPE. **Balço Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p. 292. 2017.
- ERMEL, A. P. C. **Literature grounded theory: método de pesquisa para investigação sobre o conhecimento científico e tecnológico**. Unisinos. São Leopoldo-RS. 2020.
- EUROPEAN UNION. DIRECTIVE 2004/8/EC: On the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market. **Official Journal of the European Union**, p. 52/50-52/60, 11 Fevereiro 2004.
- FALIN, L. The 5 Best RV Space Heaters You Need To Try! **RV Share**, 2020. Disponível em: <<https://rvshare.com/blog/best-rv-space-heaters/>>. Acesso em: 19 Maio 2021.
- FLANAGAN, D. RV Propane Heater – 7 Things You Need To Know. **RVshare**, 2019. Disponível em: <<https://rvshare.com/blog/rv-propane-heater/>>. Acesso em: 25 Maio 2021.
- GRUPEL. **GRUPEL S.A. – energy everywhere**, 2020. Disponível em: <<https://grupel.eu/en/grupel-en/genset/#:~:text=A%20genset%20refers%20to%20an,a%20base%20with%20other%20elements.>>. Acesso em: 13 Maio 2021.
- GW ENERGY. GW 2000 TCI. **GW Energy**, 2023. Disponível em: <<https://gwenergy.com.br/tci.html>>. Acesso em: 27 Novembro 2023.
- HENGZHI, L. **AC/DC power and heat supply system for vehicle engin**. CN108487989, 4 Setembro 2018.
- HONDA. **Honda produtos de força**, 2021. Disponível em: <<https://www.honda.com.br/produtos-de-forca/eu22i>>. Acesso em: 29 Outubro 2021.
- HUA, Z.; JINAN, L. **Heat-exchange water tank for motor home**. CN106016704, 2016 Outubro 2016.
- IAN BEAUSOLEIL-MORRISON. **An Experimental and Simulation-Based Investigation of the Performance of Small-Scale Fuel Cell and Combustion-Based Cogeneration Devices Serving Residential Buildings**. Government of Canada. [S.l.], p. 70. 2008. (978-0-662-47924-6).
- IPPOLITO, F.; VENTURINI, M. **Development of a simulation model of transient operation of micro-CHP systems in a microgrid**. ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Charlotte: [s.n.]. 2017.
- IPPOLITO, F.; VENTURINI, M. **Micro-CHP system transient operation in a residential user microgrid**. 30th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. San Diego: [s.n.]. 2017B.

- IPPOLITO, F.; VENTURINI, M. Development of a Simulation Model of Transient Operation of Micro-Combined Heat and Power Systems in a Microgrid. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, 140, n. 3, 1 Março 2018. 15.
- IPPOLITO, F.; VENTURINI, M. Micro Combined Heat and Power System Transient Operation in a Residential User Microgrid. **Journal of Energy Resources Technology**, 141, n. 4, 1 Abril 2019. 9.
- ITU TRAILERS IMPORTS. Trailer Winnebago Micro Minnie. **Itu Trailers Imports**, 2021. Disponível em: <<https://itutrailerimports.com.br/trailer-winnebago-micro-minnie/>>. Acesso em: 19 Maio 2021.
- JOHANSSON, L. **Stirling Technology Provides Quiet Non-Polluting, Efficient Energy for RV Use**. National West Coast Meeting. San Diego: SAE Technical Paper. 1 Fevereiro 1978.
- KECHONG, X.; XIANGRONG, F.; HONGQING, Z. **Car as a house tail gas recycling utilizes system**. CN206737987, 12 Dezembro 2017.
- KENDALL, M.; MEADOWCROFT, A. D.; KENDALL, K. **Microtubular solid oxide fuel cells (mSOFCs)**. ECS Transactions. [S.l.]: The Electrochemical Society. 2013. p. 123-131.
- KHATRI, K. K. et al. Experimental investigation of CI engine operated Micro-Trigeneration system. **Applied Thermal Engineering**, 30, n. 11-12, Agosto 2010. 1505-1509.
- KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. **Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering**. School of Computer Science and Mathematics of the Keele University & Department of Computer Science of the University of Durham. [S.l.]. 2007.
- KLAUS, V. **Vehicle dc power supply fuel cell**. GB2387584, 21 Maio 2003.
- KLINE, S. J.; MCCLINTOCK, F. A. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. **Mechanical Engineering**, v. 75, n. 1, p. 3-8, Janeiro 1953.
- KOLB, G. et al. **Micro-structured fuel processors as hydrogen source for fuel cells in future distributed energy generation systems**. 2011 AIChE Spring Meeting and 7th Global Congress on Process Safety. [S.l.]: American Institute of Chemical Engineers. 2011.
- LIN, L. et al. An experimental investigation of a household size trigeneration. **Applied Thermal Engineering**, 27, n. 2-3, Fevereiro 2007. 576-585.
- LORENZETTI S.A. Aquecedores de água a gás, 2021. Disponível em: <<https://www.lorenzetti.com.br/produto/lz-750bp>>. Acesso em: 19 Setembro 2022.
- LOUIS, P. R. **Procede et Dispositif de Production D'eau Chaude a Usage Domestique a partir de L'energie Perdue au Cours du Refroidissement des Moteurs de Vehicules**. FR2507752, 17 Dezembro 1982.
- LOUIS, P. R. **Process and Device for Producing Domestic Hot Water from the Heat Power Wasted in Cooling Down Vehicle Engines**. WO1982004474, 23 Dezembro 1982.
- LOUIS, P. R. **Process and Device for Producing Domestic Hot Water from the Heat Power Wasted in Cooling Down Vehicle Engines**. EP0081512, 22 Junho 1983.
- LOUIS, P. R. **Process and Device for Producing Domestic Hot Water from the Heat Power Wasted in Cooling Down Vehicle Engines**. JP1983500863, 26 Maio 1983.
- MERCADO LIVRE. Ebazar.com.br LTDA. **Mercado Livre**, 2023. Disponível em: <<https://www.mercadolivre.com.br/>>. Acesso em: 7 Dezembro 2023.
- MÍGUEZ, J. L. et al. Feasibility of a new domestic CHP trigeneration with heat pump: I. Design and development. **Applied Thermal Engineering**, 24 (10), pp. 1409-1419. Citado 67 vezes., 24, n. 10, Julho 2004. 1409-1419.

- MOHER, D.; SHAMSEER, L.; CLARKE, M. E. A. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. **Systematic Reviews**, n. 4:1, 2015.
- MOTOR TRAILER DO BRASIL. A Parte Elétrica dos Motor Homes. **Motor Trailer**, 2018. Disponível em: <<http://motortrailer.com.br/blog/a-parte-eletrica-dos-motor-homes/>>. Acesso em: 18 Maio 2021.
- MOURA. Baterias estacionárias. **Acumuladores Moura**, 2021. Disponível em: <<https://www.moura.com.br/blog/o-que-e-bateria-estacionaria/>>. Acesso em: 10 Junho 2021.
- MOWGLI ADVENTURES. 6 Best Diesel Heaters for Campervans & RVs | A Buyer's Guide. **Mowgli Adventures**, 2021. Disponível em: <<https://mowgli-adventures.com/diesel-heaters-for-campervans-rvs/>>. Acesso em: 20 Maio 2021.
- NOGUEIRA, L. A. H.; HOLLANDA, J. B. D. Revendo a paridade entre etanol hidratado e gasolina em. **Etanol eficiente**, 2015. Disponível em: <<http://etanoleficiente.org.br/artigo/2015/05/revendo-paridade-entre-etanol-hidratado-e-gasolina-veiculos>>. Acesso em: 10 Fevereiro 2021.
- OLAND, C. B. **Guide to Combined Heat and Power Systems for Boiler Owners and Operators**. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Oak Ridge, Tennessee. 2004.
- ONOVWIONA, H. I.; UGURSAL, V. I. Residential cogeneration systems: Review of the current technology. **Renewable and Sustainable Energy Review**, 10, Outubro 2006. 389-431.
- PEREZ, M. I. P.; SIERRA, J. L.. **Dispositivo para la recuperación de calor residual en autocaravanas y vehículos similares**. ES1066208 (U), 16 Dezembro 2007.
- PERRONE, D. et al. Energy and Economic Investigation of a Biodiesel-Fired Engine for Micro-Scale Cogeneration. **Energies**, 14, n. 2, Janeiro 2021.
- PETTICREW, M.; ROBERTS, H. **Systematic Reviews in the Social Sciences**. 1^a. ed. Malden, MA: Blackwell Publishing, 2006.
- PIVARI, M. Parte Elétrica do RV. **Macamp**, 2000. Disponível em: <https://macamp.com.br/parte_eletrica/>. Acesso em: 18 Maio 2021.
- POPULAR MECHANICS. The Best Portable Generators to Keep Your Home Running. **Hearst Magazine Media, Inc**, 2021. Disponível em: <<https://www.popularmechanics.com/home/a24797353/home-generator/>>. Acesso em: 30 Abril 2021.
- PORTACHARGER. **Portacharger - Gas Powered DC Generators**, 2021. Disponível em: <<http://www.portacharger.com/our-generators>>. Acesso em: 13 Maio 2021.
- POSSIDENTE, R. et al. Experimental analysis of micro-cogeneration units based on reciprocating internal combustion engine. **Energy and Buildings**, 38, n. 12, Dezembro 2006. 1417 - 1422.
- PROPEX. HS2000 Blown Air Heater. **Propex Canadá**, 2021. Disponível em: <<https://propexcanada.com/product/hs2000-blown-air-heater/>>. Acesso em: 25 Maio 2021.
- PRZYBYŁA, G. et al. The tests of micro-CHP prototype with SI engine powered by LPG and natural gas. **Combustion Engines**, n. 189 (2), 5 Abril 2022. 47-53. Disponível em: <<https://doi.org/10.19206/CE-142951>>.
- PURSEL, B. Solar Power For Your RV – Is It Worth It? **RV with TITO**, 2020. Disponível em: <<https://www.rvwithtito.com/articles/solar-for-your-rv/>>. Acesso em: 26 Maio 2021.

- REY, G. et al. Performance analysis, model development and validation with experimental data of an ICE-based micro-CCHP system. **Applied Thermal Engineering**, 76, 2 Fevereiro 2015. 233-244.
- REY, G. et al. Development of an ICE-based micro-CHP system based on a stirling engine; methodology for a comparative study of its performance and sensitivity analysis in recreational sailing boats in different European climates. **Energies**, 9, n. 4, 1 Abril 2016.
- ROBERT BOSCH GMBH. **Bosch**, 2021. Disponível em: <<https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/sensors/hotfilm-airflow-sensor/>>. Acesso em: 04 Janeiro 2022.
- ROSATO, A.; SIBILIO, S. Calibration and validation of a model for simulating thermal and electric performance of an internal combustion engine-based micro-cogeneration device. **Applied Thermal Engineering**, 45-46, Dezembro 2012. 79-98.
- ROSATO, A.; SIBILIO, S. Energy performance of a micro-cogeneration device during transient and steady-state operation: Experiments and simulations. **Applied Thermal Engineering**, 52, n. 2, 15 Abril 2013. 478-491.
- ROSATO, A.; SIBILIO, S. Performance assessment of a micro-cogeneration system under realistic operating conditions. **Energy Conversion and Management**, 70, Junho 2013B. 149-162.
- ROSATO, A.; SIBILIO, S.; CIAMPI, G. Dynamic performance assessment of a building-integrated cogeneration system for an Italian residential application. **Energy and Buildings**, 64, Setembro 2013. 343-358.
- ROSATO, A.; SIBILIO, S.; CIAMPI, G. Energy, environmental and economic dynamic performance assessment of different micro-cogeneration systems in a residential application. **Applied Thermal Engineering**, 59, n. 1-2, 25 Setembro 2013. 599-617.
- ROSELLI, C. et al. Experimental analysis of microcogenerators based on different prime movers. **Energy and Buildings**, 43, n. 4, Abril 2011. 796-804.
- SHINOHARA, R. **Heat Transfer Performance of a Double Tube Type Light Duty Exhaust Heat Recovery Heat Exchanger**. SAE/JSAE 2014 Small Engine Technology Conference & Exhibition. Pisa: SAE Technical Paper. 2014.
- SHUHE, Z. **Efficient car as a house blast pipe waste heat recovery device**. CN207080268, 9 Março 2018.
- SIBILIO, S. et al. Assessment of micro-cogeneration potential for domestic trigeneration. **International Journal of Environmental Technology and Management**, 7, 2007. 147-164.
- SIMADER, G. R.; KRAWINKLER, R.; TRNKA, G. **Micro CHP systems: state-of-the-art**. European Commission. Viena. 2006.
- SMITH, M. A.; FEW, P. C. Domestic-scale combined heat-and-power system incorporating a heat pump: Analysis of a prototype plant. **Applied Energy**, 70, n. 3, Novembro 2001. 215-232.
- STÄRKX. **Stärkx**, 2021. Disponível em: <<https://starkx.com.br/relacao-a-f-em-funcao-do-combustivel/>>. Acesso em: 11 Fevereiro 2022.
- STEMAC. Blog Stemac. **Stemac Grupos Geradores**, 2021. Disponível em: <<http://www.blogstemac.com.br/artigos-tecnicos/o-que-sao-grupos-geradores/>>. Acesso em: 30 Abril 2021.
- TAIE, Z. et al. Detailed thermodynamic investigation of an ICE-driven, natural gas-fueled, 1 kWe micro-CHP generator. **Energy Conversion and Management**, 166, 15 Junho 2018. 663-673.

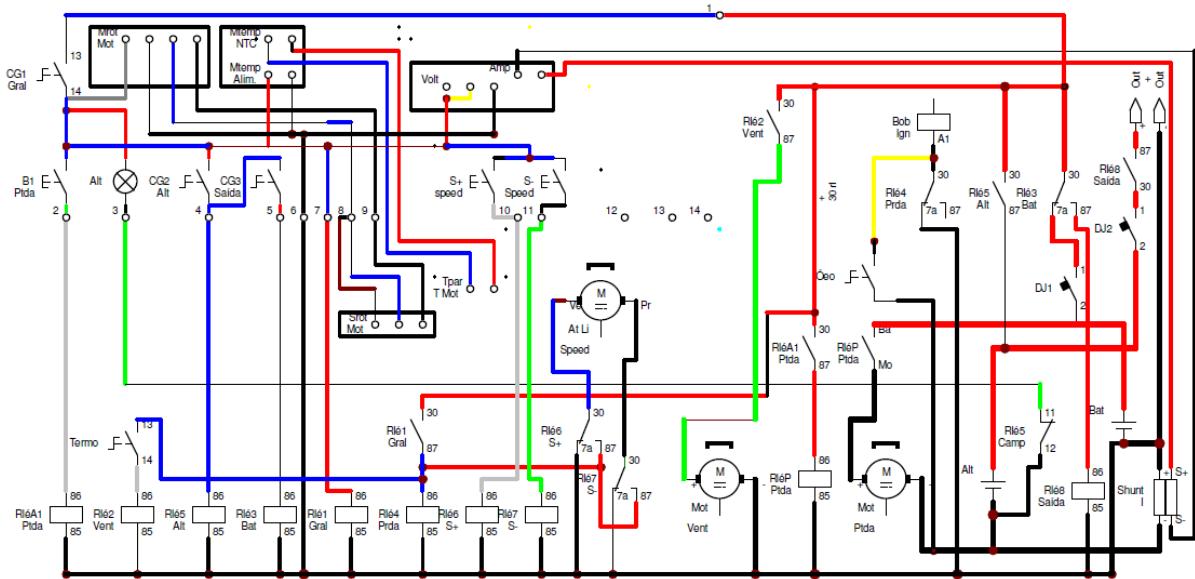
- TAIE, Z.; HAGEN, C. Experimental thermodynamic first and second law analysis of a variable output 1–4.5 kWe, ICE-driven, natural-gas fueled micro-CHP generator. **Energy Conversion and Management**, 180, 15 Janeiro 2019. 292-301.
- TECHNOMASTER. Motorhome - inversores. **Technomaster**, 2021. Disponível em: <<https://technomaster.com.br/categoria-produto/motor-home/>>. Acesso em: 10 Junho 2021.
- THIEM, M.; TAKEISHI, M.; MIWA, K. **Introduction of micro combined heat and power generation unit for residential use in Germany**. International Gas Union Research Conference 2011. [S.l.]: International Gas Research Conference Proceedings. 2011. p. 2610 - 2625.
- THOMAS, B. Benchmark testing of Micro-CHP units. **Applied Thermal Engineering**, 28, n. 16, Novembro 2008. 2049-2054.
- TOYAMA DO BRASIL. Toyama power products. **GERADOR DIGITAL – TG2000IP-220**, 2020. Disponível em: <<https://toyama.com.br/produto/gerador-digital-tg2000ip-220/>>. Acesso em: 29 Outubro 2021.
- TRAILERS COYOTE. Coyote Trailer 600, 2021. Disponível em: <<https://coyotetrailer.com.br/coyote-trailer-600/>>. Acesso em: 17 Setembro 2022.
- TURISCAR. Por que Turiscar? **Turiscar**, 2016. Disponível em: <<http://turiscar.com.br/site/porque-turiscar/>>. Acesso em: 19 Maio 2021.
- ULLOA, C. et al. Application Model for a Stirling Engine Micro-Generation System in Caravans in Different European Locations. **Energies**, 6, n. 2, 6 Fevereiro 2013. 717-732.
- ULLOA, C. et al. Feasibility of using a Stirling engine-based micro-CHP to provide heat and electricity to a recreational sailing boat in different European ports. **Applied Thermal Engineering**, 59, n. 1-2, 25 Setembro 2013. 414-424.
- VALEO. Valeo Service, 2023. Disponível em: <<https://catalogoexpresso.com.br/valeo/>>. Acesso em: 09 Agosto 2023.
- WALKER, G.; FAUVEL, R. **Applications for Stirling Engines - A Personal View**. 3rd International Stirling Engine Conference. [S.l.]: Assoc Termotecnica Italiana. 1986. p. 171-196.
- WEBASTO. Webasto Thermo & Confort. **Webasto Feel de Drive**, 2021. Disponível em: <<https://www.webasto-comfort.com/int/product-overview/product/show/air-top-2000-stc-3-1/>>. Acesso em: 20 Maio 2021.
- WERNER, D. K.; BARBER, R. E. **Working Fluid Selection for a Small Rankine Cycle Total Energy System for Recreation Vehicles**. Intersoc Energy Convers Eng Conf, 8th, Proc, Pap. [S.l.]: [s.n.]. 1973. p. 146 - 151.
- WILDCAT. **Wildcat Power Gen**, 2021. Disponível em: <<https://wildcatpowergen.com/collections/maverick-dc-generators>>. Acesso em: 13 Maio 2021.
- XICHUN, L.; SHEN, W. **Motor home fuel warm air waste heat recovery heating water purification device**. CN210289956, 10 Abril 2020.

APÊNDICE A – SISTEMAS ELÉTRICOS DO mCHP-Ex

SISTEMA ELÉTRICO DE CONTROLE

O mCHP-Ex foi construído para ser um protótipo experimental e não para utilização aplicada, porém, o dispositivo possui numerosos componentes elétricos de monitoramento e comando, o que implica na possibilidade de falhas durante os ensaios operacionais. Para diminuir os riscos de paradas ou retrabalhos durante os ensaios e pré-ensaios toda a construção foi feita de forma robusta e organizado, com local apropriado para concentrar os relés de comando, com traçados independentes para as fiações de controle e instrumentação. Além disso, foi feito o esquema elétrico do mCHP-Ex, que consta na Figura 58, para que no caso de alguma ocorrência de falha, a manutenção pudesse ser rápida e sem retrabalhos.

Figura 58 – Esquema elétrico de monitoramento e comando



Fonte: Elaborado pelo autor.

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Separado do sistema de monitoramento e comando do mCHP-Ex, existe a instrumentação com o sistema de aquisição de dados, que tem como central uma placa de prototipagem eletrônica de código aberto modelo Mega 2560. Diversos sensores, conforme relacionados na Figura 34 e na Tabela 19, ambas do Item 4.2.1, enviam informações ao Mega 2560. A conexão entre a central e os sensores é feita por meio de outras placas desenvolvidas para organizar os componentes eletrônicos e bornes de conexão das fiações.

A vela, o cabo de vela e o conector (“cachimbo”) originais do motor foram substituídos por componentes resistivos. Antes dessas alterações o sistema de aquisição de dados apresentava falhas que impediam o registro dos dados. A alimentação dos sensores foi realizada por meio dos reguladores de tensão LM7805, conectados uma bateria independente do circuito de potência do mCHP-Ex. Além disso, na entrada de alimentação da instrumentação foi instalado um capacitor de 470 μ F para estabilização da tensão.

APÊNDICE B – PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DOS MAFs

Com a alteração dos diâmetros internos das carcaças dos MAFs, foi necessário recalibrar as curvas de resposta dos sensores. Para estabelecer a faixa de calibração dos MAFs foi realizada um ensaio operacional preliminar no mCHP-Ex em regime de rotação máxima com carga plena no alternador. Com esse teste foram identificados os maiores valores de tensão, tanto no MAF-1 quanto no MAF-2, respectivamente 2143,69 mV e 2652,19 mV. Os valores iniciais de 1000 mV são o padrão para os MAFs na condição sem fluxo de ar.

CALIBRAÇÃO DO MAF-2

O ensaio de calibração do MAF-2 foi realizado no dia 11/08/2023 em uma bancada de fluxo para ensaio de cabeçotes automotivos MOTORPOWER 200. A faixa de calibração foi de 0,0525 kg/s até 0,0946 kg/s, sendo este último o limite de capacidade da bancada.

Figura 61 – Calibração MAF-2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 25 constam os dados estatísticos do ensaio de calibração do MAF-2. Os valores de médias são relativos à dez tomadas de dados de cada uma das seis etapas. A Incerteza foi determinada com a combinação da incerteza estatística do ensaio (Tipo A) com a incerteza do equipamento de calibração (Tipo B), sendo esta, a propagação de incertezas da bancada de fluxo e do voltímetro utilizado para medição do sinal de tensão do sensor (multímetro Minipa ET-2402B).

Tabela 25 – Dados estatísticos da calibração do MAF-2

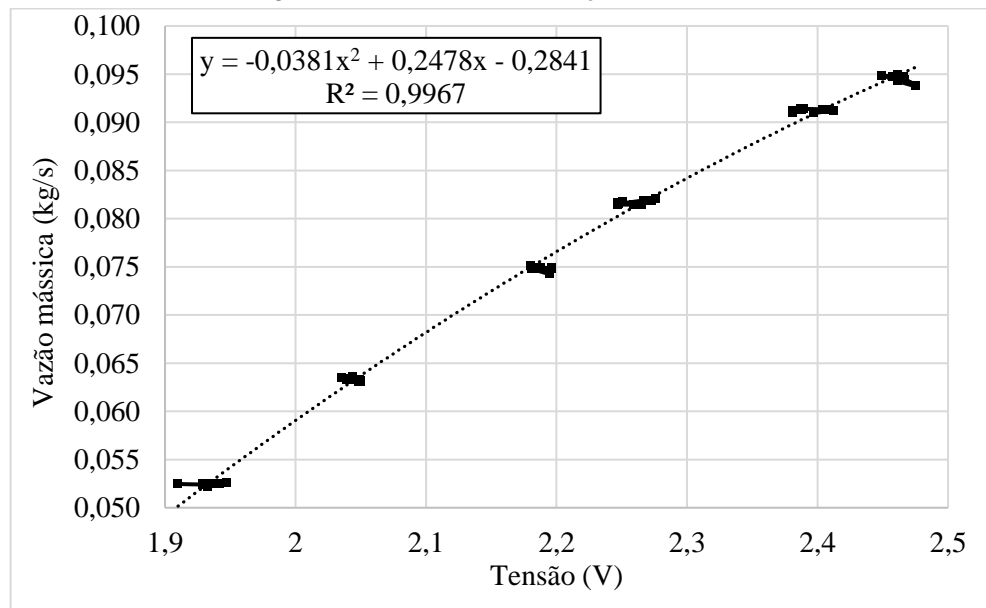
Etapa	Média		Incerteza Tipo A		Incerteza Tipo B		Incerteza MAF-2	
	(kg/s)	(mV)	\pm (kg/s)	\pm (mV)	\pm (kg/s)	\pm (mV)	\pm (kg/s)	\pm (mV)
1	0,0525	1932,5	0,00003	2,91	0,0002	0,97	0,00020	3,06
2	0,0633	2044,4	0,00005	1,62	0,0002	1,03	0,00021	1,92
3	0,0748	2187,6	0,00006	1,85	0,0002	1,10	0,00021	2,15
4	0,0817	2260,1	0,00007	3,36	0,0002	1,14	0,00021	3,54
5	0,0912	2392,8	0,00004	3,51	0,0002	1,20	0,00020	3,71
6	0,0946	2462,9	0,00010	2,01	0,0002	1,24	0,00022	2,36

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Todavia, como o valor declarado da incerteza Tipo B do sensor em sua carcaça original é de 3%, valor que fica acima dos valores de incerteza indicados pelo procedimento de calibração, foi considerada a maior incerteza, ou seja, 3% do valor medido.

Na Figura 62 é mostrado o gráfico com a curva de calibração do MAF-2. A partir dos pontos registrados foi criada uma linha de tendência que originou a equação utilizada para determinação do fluxo referente à tensão indicada no MAF.

Figura 62 – Curva de calibração do MAF-2



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Substituindo y por \dot{m}_a e x por U_{MAF-2} na equação da linha de tendência, tem-se a Equação (29), que foi utilizada para os cálculos de determinação da vazão mássica do ar de arrefecimento no ensaio do mCHP-Ex.

$$\dot{m}_a = -0,0381 \cdot U_{MAF-2}^2 + 0,2478 \cdot U_{MAF-2} - 0,2841 \quad (29)$$

CALIBRAÇÃO DO MAF-1

Não foi possível realizar a calibração do MAF-1 (ar de admissão) na bancada de ensaio, pois, o fluxo necessário é muito baixo para o fluxômetro da bancada. Portanto, para adequação da curva de resposta deste MAF, foi realizado um procedimento de avaliação da relação entre a variação do diâmetro da carcaça e o fluxo indicado pelo sensor. Para desenvolver este procedimento foi utilizado o *data sheet* do sensor, onde constam as relações de tensão para cada fluxo em diferentes carcaças de montagem do sensor. Tais dados constam na Tabela 26.

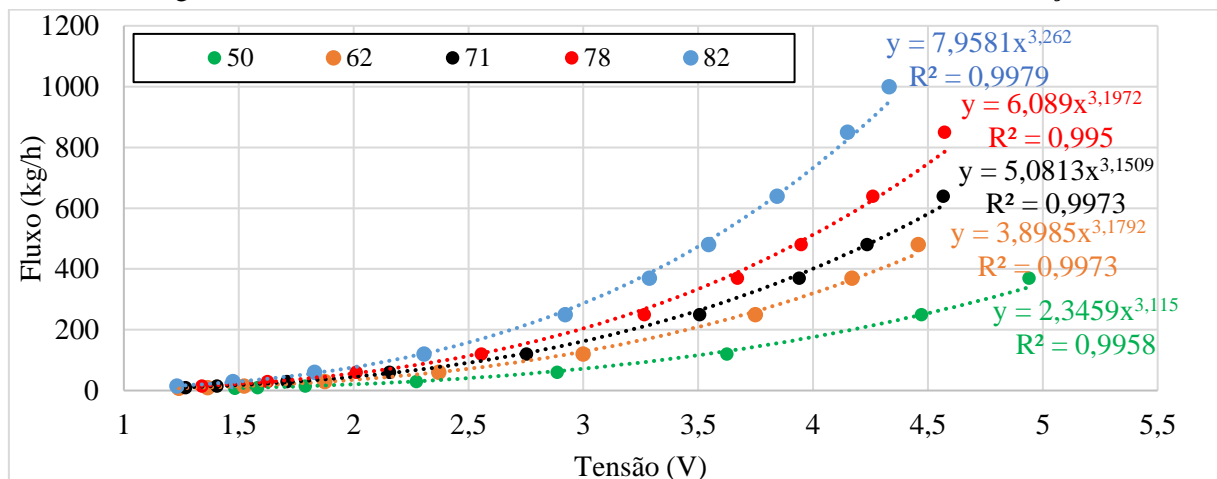
Tabela 26 – Relações entre U e \dot{m} para diferentes diâmetros de carcaça do MAF

Vazão mássica (kg/h)	Tensão (V)				
	50 mm	62 mm	71 mm	78 mm	82 mm
8	1,4837	1,239			
10	1,5819	1,3644	1,2695		
15	1,7898	1,5241	1,406	1,3395	1,2315
30	2,2739	1,8748	1,71	1,6251	1,4758
60	2,8868	2,371	2,1563	2,0109	1,831
120	3,6255	2,9998	2,7522	2,5564	2,3074
250	4,4727	3,7494	3,507	3,2655	2,9212
370	4,9406	4,1695	3,9393	3,6717	3,2874
480		4,4578	4,2349	3,949	3,5461
640			4,5669	4,26	3,8432
850				4,5727	4,1499
1000					4,3312

Fonte: Adaptado de (ROBERT BOSCH GMBH, 2021).

A partir destes dados foi plotado um gráfico e inseridas linhas de tendência em cada curva, conforme Figura 63.

Figura 63 – Curvas características do MAF em diferentes diâmetros de carcaça



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com as equações destas linhas de tendência foi feita a projeção dos fluxos para os valores de tensão na faixa entre 1,3 V e 2,2 V, haja vista que esta é a faixa de operação do mCHP-Ex. Tais dados constam na Tabela 27.

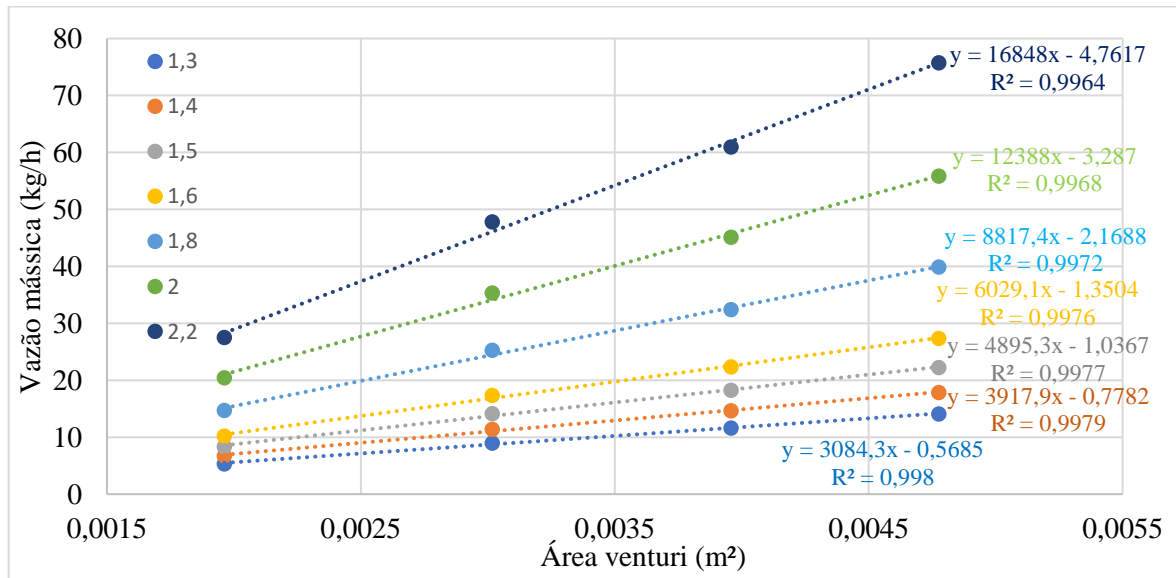
Tabela 27 – Projeção dos valores de fluxo para a faixa de tensão usual do mCHP-Ex

Tensão (V)	Vazão mássica (kg/h)				
	50 mm 0,001963 m ²	62 mm 0,003018 m ²	71 mm 0,003957 m ²	78 mm 0,004776 m ²	82 mm 0,005278 m ²
1,3	5,34	8,98	11,61	14,09	18,73
1,4	6,73	11,36	14,67	17,85	23,85
1,5	8,34	14,15	18,23	22,26	29,87
1,6	10,20	17,37	22,34	27,36	36,87
1,8	14,72	25,26	32,38	39,88	54,14
2,0	20,44	35,31	45,13	55,85	76,34
2,2	27,50	47,81	60,94	75,74	104,2

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com base nestes dados foi plotado um novo gráfico, mostrado na Figura 64, e inseridas as linhas de tendência das curvas.

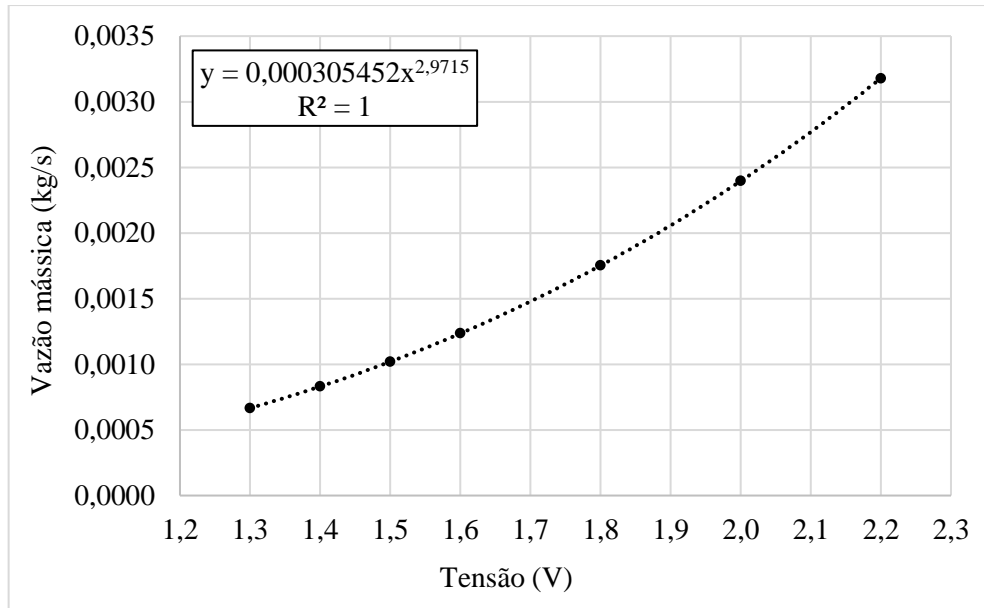
Figura 64 – Curvas características do MAF em diferentes diâmetros de carcaça



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com as equações que definem estas linhas de tendência, foi feita a projeção dos fluxos mássicos referente à faixa de tensão entre 1,3 V e 2,2 V, para a carcaça com diâmetro de 35 mm (área de 0,001075 m²), originando a curva mostrada no gráfico da Figura 65.

Figura 65 – Curvas características do MAF para carcaça com diâmetro de 35 mm



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Traçando a linha de tendência desta curva, obtém-se a Equação (30), que foi utilizada para os cálculos de determinação da vazão mássica do ar de admissão no ensaio do mCHP-Ex.

$$\dot{m}_g = 0,000305452 \cdot U_{MAF-1}^{2,9715} \quad (30)$$

APÊNDICE C – PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DOS NTCs

Para a faixa de temperaturas entre 7,31 °C e 78,75 °C a calibração foi realizada com um banho termostático Quimis Q214M, do laboratório de ciências térmicas da Unisinos. O limite inferior foi definido arbitrariamente com o intuito de abranger com garantia uma temperatura equivalente a temperatura possível de um dia frio durante os ensaios experimentais. O limite superior foi determinado pela capacidade do fluido do banho termostático operar sem evaporação demasiada. O sensor de temperatura deste banho termostático é um PT100 com sensibilidade de $\pm 0,1$ °C. Na Tabela 28 constam os resultados da calibração para a faixa de 7,31 °C a 78,75 °C.

Tabela 28 – Resultados do procedimento de calibração dos NTCs

Faixa	Média		Incerteza Tipo A		Incerteza Tipo B	
	(°C)	(Ω)	(°C)	(Ω)	(°C)	(Ω)
1	7,35	210880	0,005	45,88	0,011	45,89
2	19,66	121714	0,001	5,34	0,010	5,43
3	39,56	54000	0,004	8,37	0,011	8,43
4	59,17	25493	0,002	2,48	0,010	2,67
5	78,75	12960	0,004	1,08	0,011	1,47

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Entretanto, a temperatura dos gases de escape na saída para a atmosfera, por vezes, ultrapassa 78,45 °C chegando a 95 °C. Para atender estes valores de temperatura, foram tomados por base a relação da resistência com a temperatura publicada no *datasheet* do sensor para a temperatura de 100 °C, sendo que a incerteza declarada é de 1%. A temperatura do motor também ultrapassa a faixa de calibração realizada com o banho termostático, pois seus valores oscilam entre 98 °C e 142 °C. Portanto, uma calibração complementar foi realizada em bancada, por meio de um procedimento simples para o valor de 161 °C, utilizando um soprador térmico, um medidor de temperatura Minipa MT-455A e um medidor de resistência Minipa ET-2402B (multímetro na função ohmímetro). As incertezas Tipo A e Tipo B, foram respectivamente, 0,237 °C e 2,85 °C, sendo a incerteza tipo B a combinação da incerteza do termopar tipo K (2,2 °C) e do medidor de temperatura (1,8 °C).

Na Tabela 29 contam as incertezas combinadas (incerteza tipo C), que foram obtidas levando em consideração a incerteza estatística do ensaio (incerteza tipo A) e a incerteza do equipamento de medição utilizado para calibração (incerteza tipo B), bem como visto na Equação (26) do Item 4.4. Para temperatura de 100 °C consta a incerteza do *datasheet* do NTC.

Tabela 29 – Incertezas combinadas dos NTCs

Faixa	Temperatura (°C)	Incerteza Tipo A \pm (°C)	Incerteza Tipo B \pm (°C)	Incerteza Tipo C \pm (°C)
1	7,35	0,005	0,011	0,012
2	19,66	0,001	0,010	0,010
3	39,56	0,004	0,011	0,012
4	59,17	0,002	0,010	0,010
5	78,75	0,004	0,011	0,012
6	100,0	-	-	1,304
7	161,0	0,237	2,84	2,850

Fonte: Elaborado pelo Autor.

APÊNDICE D – DETERMINAÇÃO DAS INCERTEZAS

Neste Apêndice são demonstrados os procedimentos para determinação das incertezas combinadas e propagadas das grandezas de interesse vistas na Figura 34 do Item 4.2.1. Para realizar os cálculos destas incertezas tomou-se por base a Tabela 30 onde constam as incertezas tipo B dos sensores utilizados.

Tabela 30 – Incertezas tipo B das medições pontuais

Ponto	Tipo B (\pm)
T_{amb}	1 °C
p_{atm}	1 hPA
UR	1%
m_f	1 g
t	1 s
N	-
U	2%
I	0,5%
\dot{m}_w	5%
\dot{m}_g	3%
\dot{m}_a	3%
T_{a1}	0,012 °C
T_{a2}	0,012 °C
T_{a3}	0,012 °C
T_{g1}	0,012 °C
T_{g2}	2,2 °C
T_{g3}	1,305 °C
T_{w1}	0,012 °C
T_{w2}	0,012 °C
T_{w3}	0,012 °C
T_{w4}	0,012 °C
T_{o1}	0,012 °C
T_{o2}	0,012 °C
T_e	2,85 °C

Fonte: Elaborado pelo Autor.

INCERTEZAS DA POTÊNCIA DE ENTRADA

O mCHP-Ex é um sistema aberto que possui dois fluxos de energia saindo do sistema (P_{el} e $P_{hr,tot}$) e um fluxo de energia entrando no sistema. A taxa de entrada de energia é a P_f , determinada pela Equação (13) do Item 4.2. Portanto, considerando o PCI_f um valor fixo, a incerteza da medição da potência de entrada é equivalente a incerteza da vazão mássica de

combustível \dot{m}_f . Por sua vez, o \dot{m}_f é determinado pela taxa de variação da massa do reservatório em relação ao tempo da etapa de ensaio.

A incerteza da taxa \dot{m}_f é dada pela propagação da incerteza da célula de carga e do contador de tempo da placa de aquisição de dados Mega 2560. Aplicando os valores de incerteza desses instrumentos (visto na Tabela 30) na Equação (27) do Item 4.4, obtém-se a Equação (31) pela qual se determina a incerteza do sistema de medição da vazão mássica de combustível.

$$I_{\dot{m}_f} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial m}{\partial t} I_m\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial t} I_t\right)^2} \quad (31)$$

$$I_{\dot{m}_f} = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{t} \cdot I_m\right)^2 + \left(-\frac{m}{t^2} \cdot I_t\right)^2}$$

No ensaio do mCHP-Ex, a $I_{\dot{m}_f}$ de $\pm 0,207\%$ a $\pm 0,212\%$ em relação à vazão mássica do combustível. A incerteza final da potência de entrada teve os mesmos valores relativos, portanto, considerou-se $\pm 0,21\%$ em relação à potência de entrada em cada etapa do ensaio do mCHP-Ex.

INCERTEZAS DA POTÊNCIA ELÉTRICA

A P_{el} foi mensurada com um divisor de tensão e um *shunt* de corrente. Como a potência elétrica é produto da tensão pela corrente ($U \cdot I$), a sua incerteza tipo B foi determinada pela combinação das incertezas individuais do divisor de tensão e do *shunt*, que podem ser vistas na Tabela 30. A partir da Equação (27) do Item 4.4 obtém-se a Equação (32) pela qual se determina a incerteza da potência elétrica, que variou de $\pm 2,06\%$ a $\pm 2,08\%$, em relação à P_{el} de cada etapa do ensaio do mCHP-Ex.

$$I_{P_{el}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial U \cdot I}{\partial U} I_U\right)^2 + \left(\frac{\partial U \cdot I}{\partial I} I_I\right)^2} \quad (32)$$

$$I_{P_{el}} = \pm \sqrt{(I \cdot I_U)^2 + (U \cdot I_I)^2}$$

INCERTEZAS DAS POTÊNCIAS DE RECUPERAÇÃO TÉRMICA

A soma das potências de recuperação térmica de cada um dos três trocadores de calor compõe a $P_{hr,tot}$, entretanto, conforme mostrado na Equação (8) do Item 4.2, para determinação da $P_{hr,tot}$ foi considerada a diferença de temperatura da água na entrada e saída do mCHP-Ex.

A recuperação térmica $P_{hr,g}$ é feita, exclusivamente, no HE-3, portanto, é indicada pela Equação (11). Já a $P_{hr,a}$ é composta pela parcela recuperada do ar de arrefecimento (P_{HE-1}) e do óleo lubrificante (P_{HE-1}), sendo assim, a $P_{hr,a}$ é definida pela Equação (12). As Equações (9), (10) e (11) do Item 4.2 indicam as parcelas de recuperação térmica de cada trocador de calor.

Tanto as parcelas $P_{hr,g}$ e $P_{hr,a}$, quanto a $P_{hr,tot}$ são dependentes de \dot{m}_w e da respectiva diferença de temperatura, além do $c_{p,w}$, que é considerado constante. Logo, as fontes de incerteza para estas medições de potência são as incertezas dos NTCs e do medidor de fluxo de água.

Incerteza das medições de fluxos mássicos

O medidor de fluxo de água indica diretamente o valor da vazão mássica em g/s, e sua incerteza tipo B declarada é de 5%. Os MAFs apresentam incerteza tipo B declarada de 3%, e esta foi considerada neste trabalho, embora, na calibração do MAF-2, a incerteza aferida ter ficado abaixo de 3%.

Durante os ensaios a incerteza do \dot{m}_w variou entre $\pm 5,0000\%$ e $\pm 5,0003\%$. A incerteza do \dot{m}_a oscilou entre $\pm 3,001\%$ e $\pm 3,004\%$ e a incerteza do \dot{m}_g , que sofreu maior influência da incerteza Tipo A, teve seus valores máximo e mínimo, respectivamente, de $\pm 3,003\%$ e $\pm 3,324\%$

Incertezas das diferenças de temperatura

As incertezas das diferenças de temperatura da água foram definidas pela propagação das incertezas dos sensores de temperatura. A Equação (33) exemplifica a propagação da incerteza da medição da diferença de temperatura ($T_{w4} - T_{w1}$), utilizada para determinação da $P_{hr,tot}$

$$I_{T_{w4}-T_{w1}} = \pm \sqrt{\left[\frac{\partial(T_{w4} - T_{w1})}{\partial T_{w4}} \cdot I_{T_{w4}} \right]^2 + \left[\frac{\partial(T_{w4} - T_{w1})}{\partial T_{w1}} \cdot I_{T_{w1}} \right]^2} \quad (33)$$

$$I_{T_{w4}-T_{w1}} = \pm \sqrt{(1 \cdot I_{T_{w4}})^2 + (-1 \cdot I_{T_{w1}})^2}$$

Os cálculos foram aplicados a cada diferença de temperatura utilizada nas equações das grandezas de interesse. A Tabela 31 mostra cada diferença de temperatura, seus respectivos valores máximo e mínimo de incerteza percentual e a aplicação.

Tabela 31 – Incertezas das diferenças de temperatura

Identificação	ΔT	Incertezas $\pm(\%)$		Utilizada para:
		Mínimo	Máximo	
$\Delta T_{w,tot}$	$T_{w4} - T_{w1}$	0,06	0,19	$P_{hr,tot}$
$\Delta T_{w,HE-1}$	$T_{w2} - T_{w1}$	0,22	0,45	P_{HE-1}
$\Delta T_{w,HE-2}$	$T_{w3} - T_{w2}$	0,19	2,21	P_{HE-2}
$\Delta T_{w,HE-3}$	$T_{w4} - T_{w3}$	0,15	5,26	$P_{HE-3} / P_{hr,g}$
$\Delta T_{w,HE-\frac{1}{2}}$	$T_{w3} - T_{w1}$	0,10	1,12	$P_{hr,a}$

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Notam-se alguns valores de incerteza mais elevados nas diferenças de temperatura que envolvem T_{w3} , chegando a 5,26%. O fato é que na condição de operação de 3000 rpm ocorreram alguns erros de leitura dispersos no ensaio, com isso, o desvio padrão para a medição da T_{w3} também foi um pouco maior e, portanto, influenciando na incerteza.

Incertezas da potência de recuperação térmica total

Para determinar a incerteza da $P_{hr,tot}$, foi feita a propagação de incertezas a partir das incertezas do fluxo \dot{m}_w e da diferença de temperatura $\Delta T_{w,tot}$ ($T_{w4} - T_{w1}$), conforme Equação (34). A incerteza $I_{P_{hr,tot}}$ variou de $\pm 1,196\%$ a $\pm 1,197\%$ no ensaio do mCHP-Ex.

$$I_{P_{hr,tot}} = \pm \sqrt{\left[\frac{\partial(\dot{m}_w \cdot \Delta T_{w,tot})}{\partial \dot{m}_w} \cdot I_{\dot{m}_w} \right]^2 + \left[\frac{\partial(\dot{m}_w \cdot \Delta T_{w,tot})}{\partial \Delta T_{w,tot}} \cdot I_{\Delta T_{w,tot}} \right]^2} \quad (34)$$

$$I_{P_{hr,tot}} = \pm \sqrt{(\Delta T_{w,tot} \cdot I_{\dot{m}_w})^2 + (\dot{m}_w \cdot I_{\Delta T_{w,tot}})^2}$$

Incertezas das potências de recuperação térmica parciais

De forma semelhante, as incertezas das demais potências de recuperação térmica parciais foram determinadas. Na Tabela 32 são mostradas todas as incertezas percentuais das potências de recuperação térmica.

Tabela 32 – Incertezas das potências de recuperação térmica

Identificação	Incertezas $\pm(\%)$	
	Mínimo	Máximo
$P_{hr,tot}$	1,196	1,197
P_{HE-1}	1,197	1,201
P_{HE-2}	1,197	1,308
P_{HE-3} e $P_{hr,g}$	1,197	1,736
$P_{hr,a}$	1,196	1,226

Fonte: Elaborado pelo Autor.

INCERTEZAS DA POTÊNCIA LÍQUIDA

A potência líquida P_{net} extraída do mCHP-Ex equivale a soma da $P_{hr,tot}$ com a P_{el} . Conforme visto na Equação (17) do Item 4.2, a P_{net} utilizada para determinação do FU , e sua incerteza é definida pela Equação (35). No ensaio do mCHP-Ex a $I_{P_{net}}$ variou entre $\pm 1,047\%$ e $\pm 1,197\%$.

$$I_{P_{net}} = \pm \sqrt{\left[\frac{\partial(P_{hr,tot} + P_{el})}{\partial P_{hr,tot}} \cdot I_{P_{hr,tot}} \right]^2 + \left[\frac{\partial(P_{hr,tot} + P_{el})}{\partial P_{el}} \cdot I_{P_{el}} \right]^2} \quad (35)$$

$$I_{P_{net}} = \pm \sqrt{(1 \cdot I_{P_{hr,tot}})^2 + (1 \cdot I_{P_{el}})^2}$$

INCERTEZAS DAS EFICIÊNCIAS

Conforme Çengel e Boles (2013) a eficiência é a relação entre a potência ou energia que se deseja num processo dividida pela potência ou energia consumida pelo processo, Equação (36).

$$Eficiência = \frac{desejado}{consumido} \quad (36)$$

Dentre as grandezas de interesse avaliadas neste trabalho, constam as relações de eficiência η_{el} , $\eta_{hr,tot}$ e FU , definidas pelas Equações (14), (15) e (17) do Item 4.2. Logicamente, todas dependem da P_f , e respectiva potência a qual estão relacionadas. Como exemplo de determinação de incerteza de uma eficiência, a Equação (37) mostra como foi definida a $I_{\eta_{el}}$.

$$I_{\eta_{el}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \frac{P_{el}}{P_f}}{\partial P_f} I_{P_f}\right)^2 + \left(\frac{\partial \frac{P_{el}}{P_f}}{\partial P_{el}} I_{P_{el}}\right)^2} \quad (37)$$

$$I_{\eta_{el}} = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{P_f} \cdot I_{P_f}\right)^2 + \left(-\frac{P_f}{P_{el}^2} \cdot I_{P_{el}}\right)^2}$$

Com as devidas alterações nos termos da Equação (37), equações semelhantes foram aplicadas para definir $I_{\eta_{hr,tot}}$ e I_{FU} . Na Tabela 33 aparecem as incertezas percentuais dessas eficiências.

Tabela 33 – Incertezas das eficiências

Identificação	Incertezas $\pm(\%)$	
	Mínimo	Máximo
η_{el}	2,00	19,13
$\eta_{hr,tot}$	0,04	0,08
FU	0,06	1,16

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Incertezas de outras relações também foram determinadas pelo método de propagação, como é o caso da eficiência volumétrica (η_v) relação ar/combustível (AF), coeficiente teórico de excesso de ar (λ), bem como a relação entre a potência elétrica e a potência de recuperação

térmica total ($P_{el}/P_{hr,tot}$). Na Tabela 34 são mostrados os resultados percentuais de incerteza dessas relações, além das incertezas das taxas de consumo específico de combustível SFC_{tot} e SFC_{el} .

Tabela 34 – Incertezas de outras relações e taxas

Identificação	Incertezas $\pm(\%)$	
	Mínimo	Máximo
η_v	0,39	0,61
AF	0,014	0,032
λ	0,268	0,352
$P_{el}/P_{hr,tot}$	0,401	4,940
SFC_{tot}	3,641	16,218
SFC_{el}	0,019	0,536

Fonte: Elaborado pelo Autor.

APÊNDICE E – TABELAS DE RESULTADOS DO ENSAIO DO mCHP-Ex

Tabela 35 – Condições ambientais e frequência de rotação

N - carga (rpm-%)	T _{amb} (°C)	Incertezas		P _{atm} (hPa)	Incertezas		UR (%)	Incertezas		N (rpm)	Incertezas	
		±(°C)	(%)		±(hPa)	±(%)		±(%)	±(%)		±(rpm)	±(%)
1998-0	27,3	1,0	3,7	965,0	1,0	0,1	59,3	0,6	1,0	1998	10,0	0,5
2026-21	27,5	1,0	3,6	964,9	1,0	0,1	58,3	0,6	1,0	2026	10,1	0,5
2001-42	27,5	1,0	3,6	964,6	1,0	0,1	57,7	0,6	1,0	2001	10,1	0,5
1998-61	27,9	1,0	3,6	964,4	1,0	0,1	56,9	0,6	1,0	1998	10,1	0,5
2029-81	27,9	1,0	3,6	964,4	1,0	0,1	57,2	0,6	1,0	2029	10,0	0,5
2023-100	28,5	1,0	3,5	964,6	1,0	0,1	55,7	0,6	1,0	2023	10,3	0,5
2179-35	27,7	1,0	3,6	964,4	1,0	0,1	57,0	0,6	1,0	2179	10,1	0,5
2173-51	27,8	1,0	3,6	964,3	1,0	0,1	56,9	0,6	1,0	2173	10,1	0,5
2178-69	27,9	1,0	3,6	964,2	1,0	0,1	56,9	0,6	1,0	2178	10,2	0,5
2183-84	28,6	1,0	3,5	964,2	1,0	0,1	55,5	0,6	1,0	2183	10,2	0,5
2198-100	28,5	1,0	3,5	964,1	1,0	0,1	48,6	0,5	1,0	2198	10,3	0,5
2426-45	27,3	1,0	3,7	964,9	1,0	0,1	58,9	0,6	1,0	2426	10,0	0,4
2425-61	27,3	1,0	3,7	964,9	1,0	0,1	58,8	0,6	1,0	2425	10,1	0,4
2398-72	28,5	1,0	3,5	964,0	1,0	0,1	53,8	0,5	1,0	2398	10,1	0,4
2423-87	28,6	1,0	3,5	963,2	1,0	0,1	47,5	0,5	1,0	2423	10,2	0,4
2436-100	28,3	1,0	3,5	963,6	1,0	0,1	47,2	0,5	1,0	2436	10,3	0,4
2615-51	28,5	1,0	3,5	964,4	1,0	0,1	55,5	0,6	1,0	2615	10,0	0,4
2620-65	27,2	1,0	3,7	964,7	1,0	0,1	59,1	0,6	1,0	2620	10,1	0,4
2613-77	28,6	1,0	3,5	962,9	1,0	0,1	47,3	0,5	1,0	2613	10,2	0,4
2618-89	28,2	1,0	3,5	963,8	1,0	0,1	47,5	0,5	1,0	2618	10,2	0,4
2620-100	27,4	1,0	3,7	964,6	1,0	0,1	48,4	0,5	1,0	2620	10,3	0,4
2789-57	28,3	1,0	3,5	964,2	1,0	0,1	50,4	0,5	1,0	2789	10,0	0,4
2802-69	28,5	1,0	3,5	962,8	1,0	0,1	47,5	0,5	1,0	2802	10,1	0,4
2809-80	27,4	1,0	3,6	965,0	1,0	0,1	58,7	0,6	1,0	2809	10,2	0,4
2831-90	27,5	1,0	3,6	965,0	1,0	0,1	58,6	0,6	1,0	2831	10,2	0,4
2805-100	26,7	1,0	3,7	965,0	1,0	0,1	53,6	0,5	1,0	2805	10,3	0,4
3002-63	28,5	1,0	3,5	962,9	1,0	0,1	47,4	0,5	1,0	3002	10,1	0,3
3003-73	27,9	1,0	3,6	964,1	1,0	0,1	47,9	0,5	1,0	3003	10,2	0,3
3008-83	27,4	1,0	3,7	965,0	1,0	0,1	50,0	0,5	1,0	3008	10,2	0,3
2998-91	26,5	1,0	3,8	965,2	1,0	0,1	53,6	0,5	1,0	2998	10,2	0,3
3008-100	26,1	1,0	3,8	965,3	1,0	0,1	54,1	0,5	1,0	3008	10,4	0,3
3208-63	28,3	1,0	3,5	963,2	1,0	0,1	47,4	0,5	1,0	3208	10,2	0,3
3203-73	27,7	1,0	3,6	964,3	1,0	0,1	47,6	0,5	1,0	3203	10,1	0,3
3191-82	27,1	1,0	3,7	964,8	1,0	0,1	50,7	0,5	1,0	3191	10,2	0,3
3198-91	26,5	1,0	3,8	965,0	1,0	0,1	53,5	0,5	1,0	3198	10,2	0,3
3210-100	26,0	1,0	3,9	965,2	1,0	0,1	54,3	0,5	1,0	3210	10,2	0,3
3395-70	27,4	1,0	3,6	964,4	1,0	0,1	48,4	0,5	1,0	3395	10,1	0,3
3410-79	27,0	1,0	3,7	964,7	1,0	0,1	51,7	0,5	1,0	3410	10,1	0,3
3401-88	26,4	1,0	3,8	965,1	1,0	0,1	53,6	0,5	1,0	3401	10,2	0,3
3404-92	25,8	1,0	3,9	965,3	1,0	0,1	54,7	0,5	1,0	3404	10,2	0,3
3400-100	25,5	1,0	3,9	965,6	1,0	0,1	56,0	0,6	1,0	3400	10,2	0,3
3569-72	26,7	1,0	3,7	964,7	1,0	0,1	53,1	0,5	1,0	3569	10,1	0,3
3592-75	26,2	1,0	3,8	965,2	1,0	0,1	54,1	0,5	1,0	3592	10,2	0,3
3608-84	25,6	1,0	3,9	965,5	1,0	0,1	55,2	0,6	1,0	3608	10,2	0,3
3591-95	25,3	1,0	4,0	965,8	1,0	0,1	57,0	0,6	1,0	3591	10,2	0,3
3637-100	24,8	1,0	4,0	965,8	1,0	0,1	58,5	0,6	1,0	3637	10,2	0,3

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 36 – Temperaturas no fluxo de ar de admissão/gases de exaustão

N - carga (rpm-%)	T _{g1} (°C)	Incertezas		T _{g2} (°C)	Incertezas		T _{g3} ±(%)	Incerteza	
		±(°C)	±(%)		±(°C)	±(%)		±(°C)	±(%)
1998-0	26,32	0,02	0,06	281,0	2,20	0,78	37,07	0,01	0,04
2026-21	26,62	0,02	0,06	293,3	2,20	0,75	39,64	0,02	0,05
2001-42	26,74	0,02	0,06	313,6	2,20	0,70	43,44	0,01	0,03
1998-61	27,22	0,02	0,06	332,4	2,20	0,66	47,25	0,02	0,04
2029-81	27,65	0,01	0,05	338,7	2,20	0,65	52,34	0,02	0,04
2023-100	28,48	0,01	0,05	351,3	2,20	0,63	58,53	0,03	0,05
2179-35	27,04	0,02	0,06	322,1	2,20	0,68	41,35	0,02	0,05
2173-51	27,34	0,02	0,05	332,2	2,20	0,66	45,14	0,02	0,03
2178-69	27,62	0,01	0,05	340,2	2,20	0,65	50,34	0,01	0,03
2183-84	28,54	0,01	0,05	350,9	2,20	0,63	55,35	0,02	0,04
2198-100	28,38	0,02	0,05	363,4	2,20	0,61	61,57	0,02	0,03
2426-45	26,09	0,01	0,06	340,3	2,20	0,65	41,45	0,01	0,03
2425-61	26,21	0,02	0,06	355,9	2,20	0,62	45,50	0,06	0,14
2398-72	28,56	0,02	0,05	359,5	2,20	0,61	54,15	0,03	0,06
2423-87	28,84	0,01	0,05	374,1	2,20	0,59	60,13	0,02	0,03
2436-100	28,65	0,02	0,05	384,4	2,20	0,57	63,67	0,02	0,04
2615-51	28,07	0,02	0,05	370,2	2,20	0,59	44,41	0,02	0,04
2620-65	26,57	0,01	0,05	386,7	2,20	0,57	45,89	0,01	0,03
2613-77	29,04	0,01	0,05	393,5	2,20	0,56	59,11	0,09	0,16
2618-89	28,49	0,02	0,05	400,0	2,20	0,55	64,65	0,06	0,09
2620-100	28,20	0,02	0,05	410,4	2,20	0,54	69,66	0,02	0,03
2789-57	28,53	0,02	0,05	404,7	2,20	0,54	46,77	0,02	0,04
2802-69	29,02	0,01	0,05	416,3	2,20	0,53	51,80	0,25	0,49
2809-80	26,86	0,02	0,06	425,9	2,20	0,52	65,88	0,04	0,06
2831-90	27,16	0,02	0,06	438,1	2,20	0,50	72,68	0,02	0,03
2805-100	27,66	0,02	0,06	440,6	2,20	0,50	77,76	0,07	0,09
3002-63	29,08	0,01	0,05	438,7	2,20	0,50	64,49	0,05	0,08
3003-73	28,73	0,02	0,05	443,8	2,20	0,50	69,19	0,03	0,04
3008-83	28,48	0,01	0,05	451,6	2,20	0,49	73,28	0,06	0,08
2998-91	27,87	0,01	0,05	455,5	2,20	0,48	79,00	1,30	1,65
3008-100	27,53	0,01	0,05	459,2	2,20	0,48	83,66	1,31	1,56
3208-63	29,02	0,02	0,05	454,3	2,20	0,48	66,00	0,05	0,07
3203-73	28,48	0,02	0,07	461,0	2,20	0,48	68,50	0,04	0,06
3191-82	28,27	0,02	0,05	464,9	2,20	0,47	72,83	0,04	0,06
3198-91	27,88	0,01	0,05	466,1	2,20	0,47	75,70	0,16	0,22
3210-100	27,38	0,01	0,05	466,5	2,20	0,47	81,19	1,31	1,61
3395-70	28,50	0,02	0,06	461,3	2,20	0,48	69,88	0,03	0,04
3410-79	28,05	0,01	0,05	459,4	2,20	0,48	72,52	0,02	0,03
3401-88	27,69	0,01	0,05	458,2	2,20	0,48	77,73	0,07	0,09
3404-92	27,17	0,01	0,05	461,5	2,20	0,48	84,02	1,31	1,56
3400-100	26,93	0,01	0,05	465,1	2,20	0,47	89,69	1,31	1,46
3569-72	27,68	0,02	0,06	459,9	2,20	0,48	73,82	0,03	0,04
3592-75	27,64	0,01	0,05	462,3	2,20	0,48	78,83	0,15	0,19
3608-84	26,90	0,01	0,05	467,4	2,20	0,47	81,99	1,30	1,59
3591-95	26,40	0,02	0,06	471,8	2,20	0,47	88,22	1,30	1,48
3637-100	25,45	0,02	0,08	476,8	2,20	0,46	95,33	1,32	1,38

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 37 – Temperaturas no fluxo de ar de arrefecimento

N - carga (rpm-%)	T _{a1} (°C)	Incertezas		T _{a2} (°C)	Incertezas		T _{a3} ±(%)	Incerteza	
		±(°C)	±(%)		±(°C)	±(%)		±(°C)	±(%)
1998-0	24,91	0,02	0,06	38,77	0,02	0,04	31,77	0,01	0,05
2026-21	25,15	0,01	0,06	40,54	0,02	0,04	32,76	0,01	0,05
2001-42	25,24	0,02	0,06	42,19	0,01	0,03	33,60	0,02	0,05
1998-61	25,64	0,02	0,06	44,34	0,01	0,03	34,79	0,02	0,04
2029-81	25,87	0,01	0,06	46,17	0,02	0,03	35,84	0,02	0,05
2023-100	26,80	0,01	0,05	48,46	0,02	0,04	37,12	0,02	0,04
2179-35	25,42	0,02	0,06	42,07	0,02	0,04	33,93	0,02	0,05
2173-51	25,70	0,02	0,06	43,41	0,01	0,03	34,69	0,01	0,04
2178-69	25,82	0,02	0,06	45,11	0,01	0,03	35,69	0,01	0,04
2183-84	26,96	0,02	0,06	47,69	0,01	0,03	36,98	0,01	0,04
2198-100	26,72	0,02	0,06	49,14	0,02	0,04	37,83	0,02	0,04
2426-45	24,93	0,02	0,06	42,44	0,01	0,03	34,37	0,01	0,04
2425-61	24,80	0,02	0,06	43,74	0,02	0,04	35,01	0,02	0,04
2398-72	26,79	0,02	0,06	47,00	0,01	0,03	37,02	0,01	0,04
2423-87	27,06	0,02	0,06	49,06	0,01	0,03	38,20	0,02	0,04
2436-100	26,95	0,02	0,06	50,24	0,02	0,03	38,76	0,01	0,04
2615-51	26,12	0,02	0,06	45,43	0,02	0,04	36,52	0,02	0,05
2620-65	24,62	0,01	0,06	45,47	0,01	0,03	36,29	0,01	0,04
2613-77	27,34	0,02	0,06	49,43	0,01	0,03	38,55	0,01	0,04
2618-89	26,88	0,02	0,06	49,39	0,03	0,05	38,50	0,02	0,05
2620-100	26,20	0,02	0,06	50,60	0,02	0,03	39,32	0,02	0,04
2789-57	26,53	0,01	0,05	47,39	0,01	0,03	37,63	0,02	0,05
2802-69	27,11	0,02	0,06	49,29	0,02	0,03	38,79	0,02	0,04
2809-80	24,95	0,02	0,07	47,94	0,02	0,04	37,84	0,02	0,05
2831-90	24,86	0,02	0,06	49,70	0,02	0,03	38,86	0,02	0,04
2805-100	25,16	0,02	0,07	51,04	0,01	0,03	39,54	0,01	0,04
3002-63	27,02	0,02	0,06	49,42	0,01	0,03	38,94	0,01	0,04
3003-73	26,54	0,02	0,06	49,97	0,01	0,03	39,32	0,02	0,04
3008-83	26,06	0,02	0,07	50,75	0,01	0,03	39,73	0,01	0,04
2998-91	25,05	0,02	0,06	51,03	0,01	0,03	39,68	0,02	0,04
3008-100	24,37	0,02	0,07	51,70	0,02	0,03	39,96	0,01	0,03
3208-63	27,05	0,02	0,06	49,56	0,01	0,03	39,12	0,01	0,04
3203-73	26,37	0,02	0,06	50,08	0,02	0,03	39,47	0,02	0,04
3191-82	25,86	0,02	0,06	50,60	0,02	0,03	39,70	0,02	0,04
3198-91	24,83	0,02	0,06	50,97	0,02	0,03	39,73	0,02	0,04
3210-100	24,14	0,02	0,07	51,29	0,02	0,03	39,81	0,01	0,04
3395-70	26,38	0,02	0,06	49,89	0,01	0,03	39,63	0,02	0,04
3410-79	25,65	0,02	0,06	50,02	0,02	0,03	39,50	0,02	0,04
3401-88	24,74	0,02	0,06	50,18	0,01	0,03	39,46	0,02	0,04
3404-92	23,95	0,02	0,07	50,54	0,01	0,03	39,55	0,01	0,04
3400-100	23,59	0,02	0,07	51,23	0,02	0,03	39,95	0,02	0,04
3569-72	25,26	0,02	0,06	49,60	0,01	0,03	39,34	0,02	0,04
3592-75	24,51	0,02	0,07	50,11	0,02	0,03	39,51	0,02	0,04
3608-84	23,75	0,02	0,06	50,30	0,02	0,03	39,52	0,02	0,04
3591-95	23,29	0,02	0,07	51,01	0,01	0,03	39,90	0,01	0,04
3637-100	23,20	0,02	0,08	51,07	0,02	0,04	39,75	0,02	0,05

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 38 – Temperaturas no fluxo de água

N - carga (rpm-%)	T _{w1} (°C)	Incertezas		T _{w2} (°C)	Incertezas		T _{w3} (°C)	Incerteza		T _{w4} (°C)	Incertezas	
		±(°C)	±(%)		±(°C)	±(%)		±(°C)	±(%)		±(°C)	±(%)
1998-0	22,78	0,01	0,06	25,73	0,01	0,05	28,60	0,01	0,05	29,71	0,01	0,05
2026-21	22,94	0,01	0,06	26,15	0,01	0,05	29,39	0,01	0,05	30,70	0,01	0,05
2001-42	23,02	0,01	0,06	26,48	0,01	0,05	30,07	0,01	0,04	31,67	0,01	0,04
1998-61	23,17	0,01	0,06	27,02	0,01	0,05	31,05	0,01	0,04	33,17	0,01	0,04
2029-81	23,36	0,01	0,06	27,56	0,01	0,05	32,06	0,01	0,04	34,68	0,02	0,04
2023-100	23,65	0,01	0,06	28,24	0,01	0,05	33,12	0,01	0,04	36,41	0,01	0,04
2179-35	23,07	0,01	0,06	26,64	0,01	0,05	30,49	0,01	0,04	32,30	0,01	0,04
2173-51	23,16	0,01	0,06	27,01	0,01	0,05	31,11	0,01	0,04	33,34	0,01	0,04
2178-69	23,33	0,01	0,05	27,45	0,01	0,05	31,96	0,01	0,04	34,70	0,01	0,04
2183-84	23,61	0,01	0,06	28,20	0,01	0,05	33,14	0,01	0,04	36,40	0,01	0,04
2198-100	23,69	0,01	0,05	28,48	0,01	0,05	33,74	0,01	0,04	37,76	0,01	0,04
2426-45	22,95	0,01	0,06	26,66	0,01	0,05	30,92	0,01	0,04	33,42	0,01	0,04
2425-61	23,04	0,01	0,06	26,89	0,01	0,05	31,39	0,01	0,04	34,43	0,01	0,04
2398-72	23,46	0,01	0,06	28,07	0,01	0,05	33,03	0,01	0,04	36,55	0,01	0,04
2423-87	23,78	0,01	0,06	28,70	0,01	0,05	34,09	0,01	0,04	38,27	0,01	0,03
2436-100	23,72	0,01	0,05	28,85	0,01	0,05	34,53	0,01	0,04	39,36	0,01	0,03
2615-51	23,54	0,01	0,06	27,88	0,01	0,05	32,79	0,01	0,04	35,98	0,02	0,04
2620-65	23,10	0,01	0,06	27,39	0,01	0,05	32,54	0,01	0,04	36,37	0,01	0,04
2613-77	23,80	0,01	0,05	28,86	0,01	0,04	34,52	0,01	0,04	38,69	0,01	0,03
2618-89	23,56	0,01	0,06	28,63	0,01	0,05	34,39	0,02	0,05	39,25	0,02	0,05
2620-100	23,36	0,01	0,06	28,80	0,01	0,04	34,96	0,01	0,04	40,45	0,01	0,03
2789-57	23,57	0,01	0,06	28,35	0,01	0,05	33,73	0,01	0,04	37,68	0,02	0,04
2802-69	23,78	0,01	0,05	28,92	0,01	0,05	34,71	0,01	0,04	39,15	0,01	0,03
2809-80	23,27	0,01	0,06	28,02	0,01	0,05	33,95	0,01	0,04	39,10	0,02	0,04
2831-90	23,31	0,01	0,06	28,45	0,01	0,05	34,69	0,01	0,04	40,52	0,01	0,04
2805-100	23,01	0,01	0,06	28,62	0,01	0,05	35,21	0,01	0,04	41,65	0,01	0,03
3002-63	23,78	0,01	0,05	29,00	0,01	0,05	34,92	0,15	0,43	39,76	0,01	0,03
3003-73	23,66	0,01	0,06	28,98	0,01	0,04	34,42	0,33	0,95	40,65	0,01	0,03
3008-83	23,33	0,01	0,06	28,94	0,01	0,05	35,58	0,11	0,30	41,54	0,01	0,03
2998-91	22,97	0,01	0,06	28,64	0,01	0,04	35,58	0,20	0,58	42,10	0,01	0,03
3008-100	22,86	0,01	0,06	28,65	0,02	0,05	35,21	0,20	0,57	42,83	0,01	0,03
3208-63	23,75	0,01	0,05	29,15	0,01	0,05	35,11	0,01	0,04	40,51	0,01	0,03
3203-73	23,54	0,01	0,06	29,03	0,01	0,05	35,26	0,01	0,04	41,17	0,01	0,03
3191-82	23,27	0,01	0,06	28,93	0,01	0,05	35,40	0,01	0,04	41,90	0,01	0,03
3198-91	22,93	0,01	0,06	28,68	0,01	0,05	35,35	0,01	0,04	42,50	0,01	0,03
3210-100	22,78	0,01	0,06	28,60	0,01	0,05	35,44	0,01	0,04	43,18	0,01	0,03
3395-70	23,44	0,01	0,06	29,06	0,01	0,04	35,51	0,01	0,04	41,62	0,01	0,03
3410-79	23,19	0,01	0,06	28,87	0,01	0,05	35,32	0,01	0,04	41,97	0,01	0,03
3401-88	22,89	0,01	0,06	28,60	0,01	0,05	35,21	0,01	0,04	42,53	0,01	0,03
3404-92	22,75	0,01	0,06	28,52	0,01	0,05	35,30	0,01	0,04	43,27	0,01	0,03
3400-100	22,72	0,01	0,06	28,62	0,01	0,05	35,65	0,01	0,04	44,23	0,01	0,03
3569-72	23,11	0,01	0,06	28,77	0,01	0,05	35,25	0,01	0,04	42,22	0,01	0,03
3592-75	22,84	0,01	0,06	28,65	0,01	0,05	35,35	0,01	0,04	42,92	0,01	0,03
3608-84	22,69	0,01	0,06	28,54	0,01	0,05	35,36	0,01	0,04	43,60	0,01	0,03
3591-95	22,65	0,01	0,06	28,57	0,01	0,05	35,70	0,01	0,04	44,50	0,01	0,03
3637-100	22,50	0,01	0,06	28,41	0,01	0,05	35,66	0,01	0,04	44,95	0,02	0,04

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 39 – Temperaturas do motor e no fluxo de óleo

N - carga (rpm-%)	T _e (°C)	Incertezas		T _{o1} (°C)	Incertezas		T _{o2} (°C)	Incerteza	
		±(°C)	±(%)		±(°C)	±(%)		±(°C)	±(%)
1998-0	98,96	2,85	2,88	51,71	0,02	0,04	27,67	0,01	0,05
2026-21	106,5	2,85	2,68	54,37	0,02	0,03	28,01	0,02	0,06
2001-42	114,2	2,85	2,50	57,20	0,03	0,04	28,30	0,02	0,05
1998-61	120,3	2,85	2,37	59,75	0,02	0,04	29,11	0,02	0,05
2029-81	127,4	2,85	2,24	62,92	0,03	0,04	29,52	0,01	0,05
2023-100	132,8	2,85	2,15	65,49	0,03	0,05	30,38	0,01	0,04
2179-35	111,0	2,85	2,57	55,88	0,02	0,04	28,61	0,02	0,06
2173-51	115,7	2,85	2,46	57,66	0,02	0,03	29,14	0,01	0,05
2178-69	121,5	2,85	2,35	60,08	0,02	0,03	29,56	0,01	0,05
2183-84	127,0	2,85	2,24	62,15	0,02	0,03	30,38	0,02	0,05
2198-100	131,9	2,85	2,16	64,50	0,02	0,03	30,76	0,01	0,05
2426-45	115,1	2,85	2,48	55,68	0,02	0,04	28,71	0,02	0,05
2425-61	119,0	2,85	2,40	57,51	0,02	0,04	29,04	0,02	0,05
2398-72	124,4	2,85	2,29	60,16	0,02	0,03	30,28	0,01	0,05
2423-87	130,6	2,85	2,18	62,70	0,02	0,03	31,15	0,01	0,05
2436-100	134,6	2,85	2,12	64,09	0,02	0,03	31,16	0,01	0,04
2615-51	121,5	2,85	2,35	57,40	0,02	0,04	30,18	0,01	0,05
2620-65	125,4	2,85	2,27	58,33	0,02	0,03	29,61	0,01	0,05
2613-77	131,7	2,85	2,16	61,97	0,02	0,03	31,28	0,01	0,04
2618-89	133,1	2,85	2,14	62,14	0,04	0,06	31,05	0,02	0,05
2620-100	140,5	2,85	2,03	64,25	0,02	0,03	31,37	0,01	0,04
2789-57	125,6	2,85	2,27	58,37	0,02	0,04	30,77	0,02	0,05
2802-69	131,0	2,85	2,18	61,33	0,02	0,03	31,48	0,01	0,05
2809-80	132,0	2,85	2,16	60,61	0,03	0,05	30,44	0,01	0,05
2831-90	135,7	2,85	2,10	62,81	0,02	0,03	30,88	0,01	0,05
2805-100	139,6	2,85	2,04	64,57	0,02	0,03	31,36	0,01	0,04
3002-63	130,0	2,85	2,19	60,26	0,02	0,03	31,78	0,01	0,05
3003-73	136,6	2,85	2,09	62,59	0,02	0,03	31,61	0,01	0,04
3008-83	138,6	2,85	2,06	63,20	0,02	0,03	31,74	0,01	0,04
2998-91	140,5	2,85	2,03	64,20	0,02	0,03	31,54	0,01	0,04
3008-100	141,1	2,85	2,02	65,16	0,02	0,03	31,56	0,01	0,04
3208-63	130,8	2,85	2,18	59,39	0,02	0,03	32,17	0,01	0,04
3203-73	136,6	2,85	2,09	61,98	0,02	0,03	31,79	0,01	0,04
3191-82	137,9	2,85	2,07	62,76	0,02	0,03	31,83	0,01	0,04
3198-91	139,1	2,85	2,05	63,75	0,02	0,03	31,62	0,01	0,04
3210-100	140,2	2,85	2,03	64,33	0,02	0,03	31,59	0,01	0,04
3395-70	135,5	2,85	2,10	60,87	0,02	0,03	32,18	0,01	0,04
3410-79	134,9	2,85	2,11	61,76	0,02	0,03	31,86	0,01	0,04
3401-88	136,1	2,85	2,09	62,49	0,02	0,03	31,59	0,01	0,05
3404-92	137,7	2,85	2,07	62,98	0,02	0,03	31,43	0,01	0,04
3400-100	138,3	2,85	2,06	63,40	0,02	0,03	31,81	0,01	0,04
3569-72	133,1	2,85	2,14	60,80	0,02	0,03	32,02	0,01	0,04
3592-75	134,4	2,85	2,12	61,97	0,02	0,03	31,80	0,02	0,05
3608-84	136,6	2,85	2,09	62,66	0,02	0,03	31,63	0,01	0,04
3591-95	137,7	2,85	2,07	62,93	0,02	0,02	31,85	0,01	0,04
3637-100	138,7	2,85	2,05	62,09	0,03	0,05	31,78	0,02	0,06

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 40 – Vazões mássicas nos fluxos

N - carga (rpm-%)	\dot{m}_w (g/s)	Incertezas		\dot{m}_g (g/s)	Incertezas		\dot{m}_a (g/s)	Incerteza	
		\pm (g/s)	\pm (%)		\pm (g/s)	\pm (%)		\pm (g/s)	\pm (%)
1998-0	34,24	1,71	5,0	0,742	0,022	3,0	69,91	2,10	3,0
2026-21	34,24	1,71	5,0	0,853	0,026	3,1	70,14	2,11	3,0
2001-42	34,26	1,71	5,0	0,929	0,029	3,1	69,13	2,08	3,0
1998-61	34,27	1,71	5,0	1,033	0,033	3,2	67,53	2,03	3,0
2029-81	34,31	1,72	5,0	1,429	0,043	3,0	66,92	2,01	3,0
2023-100	34,34	1,72	5,0	1,413	0,045	3,2	67,06	2,01	3,0
2179-35	34,29	1,71	5,0	0,917	0,030	3,2	73,34	2,20	3,0
2173-51	34,34	1,72	5,0	0,982	0,032	3,3	72,92	2,19	3,0
2178-69	34,34	1,72	5,0	1,117	0,037	3,3	72,34	2,17	3,0
2183-84	34,35	1,72	5,0	1,251	0,041	3,3	72,60	2,18	3,0
2198-100	34,36	1,72	5,0	1,453	0,047	3,2	72,66	2,18	3,0
2426-45	34,32	1,72	5,0	1,238	0,037	3,0	78,70	2,36	3,0
2425-61	34,34	1,72	5,0	1,098	0,035	3,2	78,19	2,35	3,0
2398-72	34,35	1,72	5,0	1,373	0,043	3,2	77,18	2,32	3,0
2423-87	34,37	1,72	5,0	1,423	0,046	3,2	77,53	2,33	3,0
2436-100	34,36	1,72	5,0	1,512	0,049	3,2	78,73	2,36	3,0
2615-51	34,37	1,72	5,0	1,457	0,044	3,0	82,93	2,49	3,0
2620-65	34,36	1,72	5,0	1,329	0,042	3,2	83,37	2,50	3,0
2613-77	34,39	1,72	5,0	1,447	0,046	3,2	83,40	2,50	3,0
2618-89	34,38	1,72	5,0	1,580	0,050	3,2	83,61	2,51	3,0
2620-100	34,35	1,72	5,0	1,757	0,055	3,2	83,98	2,52	3,0
2789-57	34,36	1,72	5,0	1,707	0,052	3,0	85,44	2,56	3,0
2802-69	34,36	1,72	5,0	1,629	0,051	3,2	86,21	2,59	3,0
2809-80	34,38	1,72	5,0	1,695	0,054	3,2	86,39	2,59	3,0
2831-90	34,36	1,72	5,0	1,844	0,059	3,2	85,97	2,58	3,0
2805-100	34,33	1,72	5,0	1,918	0,061	3,2	87,18	2,62	3,0
3002-63	34,37	1,72	5,0	1,834	0,058	3,2	88,33	2,65	3,0
3003-73	34,38	1,72	5,0	2,004	0,063	3,2	88,71	2,66	3,0
3008-83	34,35	1,72	5,0	2,057	0,065	3,2	89,91	2,70	3,0
2998-91	34,34	1,72	5,0	2,132	0,068	3,2	90,08	2,70	3,0
3008-100	34,33	1,72	5,0	2,196	0,070	3,2	91,20	2,74	3,0
3208-63	34,40	1,72	5,0	2,060	0,066	3,2	90,48	2,72	3,0
3203-73	34,36	1,72	5,0	2,139	0,068	3,2	90,93	2,73	3,0
3191-82	34,35	1,72	5,0	2,267	0,072	3,2	91,26	2,74	3,0
3198-91	34,35	1,72	5,0	2,283	0,073	3,2	91,59	2,75	3,0
3210-100	34,33	1,72	5,0	2,359	0,075	3,2	93,38	2,80	3,0
3395-70	34,38	1,72	5,0	2,210	0,071	3,2	93,19	2,80	3,0
3410-79	34,33	1,72	5,0	2,302	0,074	3,2	93,08	2,79	3,0
3401-88	34,34	1,72	5,0	2,382	0,077	3,2	93,71	2,81	3,0
3404-92	34,33	1,72	5,0	2,453	0,079	3,2	95,20	2,86	3,0
3400-100	34,34	1,72	5,0	2,557	0,082	3,2	96,25	2,89	3,0
3569-72	34,35	1,72	5,0	2,314	0,076	3,3	94,83	2,85	3,0
3592-75	34,34	1,72	5,0	2,462	0,082	3,3	96,02	2,88	3,0
3608-84	34,32	1,72	5,0	2,551	0,085	3,3	97,12	2,91	3,0
3591-95	34,36	1,72	5,0	2,646	0,088	3,3	97,95	2,94	3,0
3637-100	34,81	1,74	5,0	2,790	0,092	3,3	97,68	2,93	3,0

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 41 – Tempo, massa de combustível, tensão e corrente

N - carga (rpm-%)	t (s)	Incertezas		m _f (g)	Incertezas		U (V)	Incerteza		I (A)	Incertezas	
		±(s)	±(%)		±(g)	±(%)		±(V)	±(%)		±(A)	±(%)
1998-0	493	1	0,20	27,07	1,00	3,69	14,48	0,29	2,0	0,00	0,01	-
2026-21	490	1	0,20	26,67	1,00	3,75	14,28	0,29	2,0	5,04	0,03	0,5
2001-42	497	1	0,20	28,52	1,00	3,51	14,25	0,29	2,0	10,05	0,05	0,5
1998-61	496	1	0,20	33,45	1,00	2,99	14,16	0,28	2,0	14,83	0,07	0,5
2029-81	491	1	0,20	40,68	1,00	2,46	13,93	0,28	2,0	19,93	0,10	0,5
2023-100	494	1	0,20	48,86	1,00	2,05	13,83	0,28	2,0	24,91	0,13	0,5
2179-35	490	1	0,20	30,82	1,00	3,24	14,21	0,29	2,0	10,12	0,05	0,5
2173-51	488	1	0,20	36,26	1,00	2,76	14,17	0,28	2,0	14,97	0,08	0,5
2178-69	491	1	0,20	43,35	1,00	2,31	14,16	0,28	2,0	20,03	0,10	0,5
2183-84	493	1	0,20	50,23	1,00	1,99	14,05	0,28	2,0	24,78	0,13	0,5
2198-100	492	1	0,20	57,89	1,00	1,73	13,55	0,27	2,0	30,53	0,15	0,5
2426-45	488	1	0,20	39,10	1,00	2,56	13,31	0,27	2,0	15,56	0,08	0,5
2425-61	492	1	0,20	44,37	1,00	2,25	13,79	0,28	2,0	20,47	0,10	0,5
2398-72	492	1	0,20	51,39	1,00	1,95	13,25	0,27	2,0	25,14	0,12	0,5
2423-87	489	1	0,20	57,87	1,00	1,73	13,31	0,27	2,0	30,23	0,15	0,5
2436-100	491	1	0,20	65,61	1,00	1,52	13,22	0,27	2,0	34,94	0,18	0,5
2615-51	488	1	0,20	43,44	1,00	2,30	13,55	0,27	2,0	19,84	0,10	0,5
2620-65	488	1	0,20	48,40	1,00	2,07	13,61	0,27	2,0	25,24	0,13	0,5
2613-77	488	1	0,20	54,19	1,00	1,85	13,45	0,27	2,0	30,07	0,15	0,5
2618-89	489	1	0,20	62,02	1,00	1,61	13,42	0,27	2,0	34,88	0,18	0,5
2620-100	485	1	0,21	68,39	1,00	1,46	13,36	0,27	2,0	39,25	0,20	0,5
2789-57	489	1	0,20	47,01	1,00	2,13	13,91	0,28	2,0	24,38	0,12	0,5
2802-69	483	1	0,21	52,48	1,00	1,91	13,65	0,27	2,0	29,99	0,15	0,5
2809-80	488	1	0,20	57,34	1,00	1,74	13,50	0,27	2,0	34,90	0,18	0,5
2831-90	485	1	0,21	63,54	1,00	1,57	13,38	0,27	2,0	39,65	0,20	0,5
2805-100	486	1	0,21	73,10	1,00	1,37	13,33	0,27	2,0	44,43	0,22	0,5
3002-63	485	1	0,21	50,31	1,00	1,99	13,64	0,27	2,0	30,09	0,15	0,5
3003-73	482	1	0,21	56,57	1,00	1,77	13,60	0,27	2,0	34,93	0,18	0,5
3008-83	487	1	0,21	63,83	1,00	1,57	13,50	0,27	2,0	39,72	0,20	0,5
2998-91	484	1	0,21	71,46	1,00	1,40	13,28	0,27	2,0	44,49	0,23	0,5
3008-100	485	1	0,21	80,65	1,00	1,24	13,11	0,26	2,0	49,35	0,25	0,5
3208-63	485	1	0,21	51,92	1,00	1,93	13,65	0,27	2,0	30,20	0,15	0,5
3203-73	485	1	0,21	58,20	1,00	1,72	13,57	0,27	2,0	34,90	0,18	0,5
3191-82	481	1	0,21	63,57	1,00	1,57	13,45	0,27	2,0	39,76	0,20	0,5
3198-91	485	1	0,21	72,89	1,00	1,37	13,32	0,27	2,0	44,45	0,23	0,5
3210-100	484	1	0,21	82,78	1,00	1,21	13,17	0,26	2,0	49,48	0,25	0,5
3395-70	484	1	0,21	61,58	1,00	1,62	13,56	0,27	2,0	35,01	0,18	0,5
3410-79	482	1	0,21	71,33	1,00	1,40	13,41	0,27	2,0	39,83	0,20	0,5
3401-88	484	1	0,21	80,51	1,00	1,24	13,29	0,27	2,0	44,69	0,23	0,5
3404-92	483	1	0,21	89,41	1,00	1,12	12,73	0,25	2,0	49,15	0,25	0,5
3400-100	484	1	0,21	98,34	1,00	1,02	13,06	0,26	2,0	51,94	0,26	0,5
3569-72	480	1	0,21	75,93	1,00	1,32	13,35	0,27	2,0	39,99	0,20	0,5
3592-75	483	1	0,21	85,31	1,00	1,17	12,76	0,26	2,0	44,09	0,22	0,5
3608-84	481	1	0,21	92,59	1,00	1,08	13,17	0,26	2,0	47,66	0,24	0,5
3591-95	483	1	0,21	100,2	1,00	1,00	13,27	0,27	2,0	53,24	0,27	0,5
3637-100	482	1	0,21	103,9	1,00	0,96	13,27	0,27	2,0	56,24	0,29	0,5

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 42 –Taxa de consumo, eficiência volumétrica, relação A/f e fator λ

N - carga (rpm-%)	\dot{m}_f (g/s)	Incertezas		η_v $\pm(\%)$	Incertezas			A/f			λ		
		$\pm(\text{g/s})$	(%)		$\pm(\%)$	$\pm(\%)$	$\pm(\%)$	$\pm(-)$	$\pm(-)$	(%)	$\pm(-)$	$\pm(-)$	$\pm(\%)$
1998-0	0,0549	0,0001	0,21	40,51	0,238	0,59	13,52	0,003	0,02	1,029	0,003	0,31	
2026-21	0,0544	0,0001	0,21	46,00	0,271	0,59	15,68	0,003	0,02	1,194	0,003	0,29	
2001-42	0,0574	0,0001	0,21	50,77	0,306	0,60	16,20	0,003	0,02	1,234	0,003	0,28	
1998-61	0,0674	0,0001	0,21	56,62	0,347	0,61	15,32	0,003	0,02	1,167	0,003	0,29	
2029-81	0,0829	0,0002	0,21	77,25	0,474	0,61	17,25	0,003	0,02	1,314	0,003	0,27	
2023-100	0,0989	0,0002	0,21	76,73	0,448	0,58	14,28	0,003	0,02	1,088	0,003	0,30	
2179-35	0,0629	0,0001	0,21	46,06	0,259	0,56	14,58	0,003	0,02	1,111	0,003	0,31	
2173-51	0,0743	0,0002	0,21	49,51	0,283	0,57	13,22	0,003	0,02	1,007	0,003	0,32	
2178-69	0,0883	0,0002	0,21	56,23	0,326	0,58	12,65	0,003	0,03	0,963	0,003	0,33	
2183-84	0,1019	0,0002	0,21	63,03	0,371	0,59	12,28	0,003	0,03	0,935	0,003	0,34	
2198-100	0,1177	0,0002	0,21	72,66	0,396	0,54	12,35	0,003	0,03	0,940	0,003	0,33	
2426-45	0,0801	0,0002	0,21	55,61	0,290	0,52	15,45	0,003	0,02	1,176	0,003	0,29	
2425-61	0,0902	0,0002	0,21	49,37	0,260	0,53	12,17	0,003	0,03	0,927	0,003	0,34	
2398-72	0,1045	0,0002	0,21	63,01	0,343	0,54	13,15	0,003	0,02	1,001	0,003	0,32	
2423-87	0,1183	0,0002	0,21	64,73	0,354	0,55	12,02	0,003	0,03	0,916	0,003	0,34	
2436-100	0,1336	0,0003	0,21	68,30	0,337	0,49	11,31	0,004	0,03	0,862	0,004	0,35	
2615-51	0,0890	0,0002	0,21	61,19	0,307	0,50	16,37	0,003	0,02	1,247	0,003	0,28	
2620-65	0,0992	0,0002	0,21	55,37	0,280	0,51	13,40	0,003	0,02	1,020	0,003	0,32	
2613-77	0,1110	0,0002	0,21	61,07	0,314	0,51	13,03	0,003	0,02	0,992	0,003	0,32	
2618-89	0,1268	0,0003	0,21	66,39	0,345	0,52	12,46	0,003	0,03	0,949	0,003	0,33	
2620-100	0,1410	0,0003	0,21	73,62	0,342	0,47	12,46	0,003	0,03	0,949	0,003	0,33	
2789-57	0,0961	0,0002	0,21	67,31	0,329	0,49	17,76	0,003	0,02	1,352	0,003	0,27	
2802-69	0,1087	0,0002	0,21	64,11	0,316	0,49	14,99	0,003	0,02	1,142	0,003	0,30	
2809-80	0,1175	0,0002	0,21	65,93	0,326	0,50	14,42	0,003	0,02	1,099	0,003	0,30	
2831-90	0,1310	0,0003	0,21	71,26	0,356	0,50	14,08	0,003	0,02	1,072	0,003	0,31	
2805-100	0,1504	0,0003	0,21	74,90	0,331	0,44	12,75	0,003	0,03	0,971	0,003	0,32	
3002-63	0,1037	0,0002	0,21	67,43	0,321	0,48	17,68	0,003	0,02	1,347	0,003	0,28	
3003-73	0,1174	0,0002	0,21	73,47	0,354	0,48	17,08	0,003	0,02	1,301	0,003	0,28	
3008-83	0,1311	0,0003	0,21	75,14	0,364	0,48	15,70	0,003	0,02	1,195	0,003	0,29	
2998-91	0,1476	0,0003	0,21	77,97	0,382	0,49	14,44	0,003	0,02	1,100	0,003	0,30	
3008-100	0,1663	0,0003	0,21	79,95	0,340	0,43	13,21	0,003	0,02	1,006	0,003	0,32	
3208-63	0,1071	0,0002	0,21	70,80	0,328	0,46	19,24	0,003	0,01	1,465	0,003	0,27	
3203-73	0,1200	0,0003	0,21	73,42	0,342	0,47	17,82	0,003	0,02	1,357	0,003	0,28	
3191-82	0,1322	0,0003	0,21	78,00	0,368	0,47	17,15	0,003	0,02	1,306	0,003	0,28	
3198-91	0,1503	0,0003	0,21	78,28	0,370	0,47	15,19	0,003	0,02	1,157	0,003	0,30	
3210-100	0,1710	0,0004	0,21	80,43	0,323	0,40	13,80	0,003	0,02	1,051	0,003	0,31	
3395-70	0,1272	0,0003	0,21	71,58	0,322	0,45	17,37	0,003	0,02	1,323	0,003	0,28	
3410-79	0,1480	0,0003	0,21	74,09	0,335	0,45	15,55	0,003	0,02	1,185	0,003	0,30	
3401-88	0,1663	0,0003	0,21	76,75	0,350	0,46	14,32	0,003	0,02	1,091	0,003	0,31	
3404-92	0,1851	0,0004	0,21	78,80	0,362	0,46	13,25	0,003	0,02	1,009	0,003	0,32	
3400-100	0,2032	0,0004	0,21	82,16	0,317	0,39	12,58	0,003	0,03	0,958	0,003	0,33	
3569-72	0,1582	0,0003	0,21	71,08	0,314	0,44	14,63	0,003	0,02	1,114	0,003	0,31	
3592-75	0,1766	0,0004	0,21	75,06	0,334	0,45	13,94	0,003	0,02	1,062	0,003	0,32	
3608-84	0,1925	0,0004	0,21	77,24	0,346	0,45	13,25	0,003	0,02	1,009	0,003	0,33	
3591-95	0,2074	0,0004	0,21	80,33	0,363	0,45	12,76	0,003	0,03	0,971	0,003	0,33	
3637-100	0,2155	0,0005	0,21	83,38	0,377	0,45	12,95	0,003	0,03	0,986	0,003	0,33	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 43 – Potências de entrada e saída do mCHP-Ex

N - carga (rpm-%)	P _f (kW)	Incertezas		P _{el} (kW)	Incertezas		P _{hr,tot} (kW)	Incertezas		P _{net} (kW)	Incertezas	
		±(kW)	±(%)		±(kW)	±(%)		±(kW)	±(%)		±(kW)	±(%)
1998-0	2,207	0,005	0,21	0	-	-	0,993	0,012	1,20	0,993	0,012	1,20
2026-21	2,188	0,005	0,21	0,072	0,001	2,07	1,111	0,013	1,20	1,183	0,013	1,13
2001-42	2,307	0,005	0,21	0,143	0,003	2,07	1,238	0,015	1,20	1,382	0,015	1,09
1998-61	2,711	0,006	0,21	0,210	0,004	2,07	1,432	0,017	1,20	1,642	0,018	1,08
2029-81	3,331	0,007	0,21	0,277	0,006	2,07	1,623	0,019	1,20	1,901	0,020	1,07
2023-100	3,976	0,008	0,21	0,345	0,007	2,07	1,831	0,022	1,20	2,176	0,023	1,06
2179-35	2,528	0,005	0,21	0,144	0,003	2,07	1,323	0,016	1,20	1,467	0,016	1,10
2173-51	2,987	0,006	0,21	0,212	0,004	2,07	1,462	0,017	1,20	1,674	0,018	1,08
2178-69	3,549	0,007	0,21	0,284	0,006	2,07	1,631	0,020	1,20	1,915	0,020	1,06
2183-84	4,096	0,008	0,21	0,348	0,007	2,07	1,835	0,022	1,20	2,184	0,023	1,06
2198-100	4,730	0,010	0,21	0,414	0,009	2,07	2,021	0,024	1,20	2,435	0,026	1,05
2426-45	3,221	0,007	0,21	0,207	0,004	2,06	1,502	0,018	1,20	1,709	0,018	1,08
2425-61	3,625	0,008	0,21	0,282	0,006	2,08	1,635	0,020	1,20	1,917	0,020	1,07
2398-72	4,199	0,009	0,21	0,333	0,007	2,07	1,880	0,022	1,20	2,213	0,024	1,06
2423-87	4,757	0,010	0,21	0,402	0,008	2,07	2,081	0,025	1,20	2,484	0,026	1,06
2436-100	5,372	0,011	0,21	0,462	0,010	2,07	2,246	0,027	1,20	2,708	0,029	1,05
2615-51	3,578	0,008	0,21	0,269	0,006	2,06	1,788	0,021	1,20	2,057	0,022	1,07
2620-65	3,987	0,008	0,21	0,343	0,007	2,07	1,906	0,023	1,20	2,250	0,024	1,06
2613-77	4,464	0,009	0,21	0,404	0,008	2,07	2,140	0,026	1,20	2,545	0,027	1,06
2618-89	5,099	0,011	0,21	0,468	0,010	2,07	2,254	0,027	1,20	2,722	0,029	1,05
2620-100	5,669	0,012	0,21	0,524	0,011	2,07	2,455	0,029	1,20	2,979	0,031	1,05
2789-57	3,865	0,008	0,21	0,339	0,007	2,07	2,027	0,024	1,20	2,366	0,025	1,07
2802-69	4,368	0,009	0,21	0,409	0,008	2,07	2,208	0,026	1,20	2,617	0,028	1,06
2809-80	4,723	0,010	0,21	0,471	0,010	2,07	2,275	0,027	1,20	2,746	0,029	1,05
2831-90	5,267	0,011	0,21	0,530	0,011	2,07	2,472	0,030	1,20	3,003	0,032	1,05
2805-100	6,047	0,013	0,21	0,592	0,012	2,07	2,674	0,032	1,20	3,266	0,034	1,05
3002-63	4,170	0,009	0,21	0,411	0,009	2,07	2,295	0,027	1,20	2,706	0,029	1,06
3003-73	4,718	0,010	0,21	0,475	0,010	2,07	2,443	0,029	1,20	2,918	0,031	1,06
3008-83	5,269	0,011	0,21	0,536	0,011	2,07	2,614	0,031	1,20	3,151	0,033	1,05
2998-91	5,935	0,012	0,21	0,591	0,012	2,07	2,746	0,033	1,20	3,337	0,035	1,05
3008-100	6,685	0,014	0,21	0,647	0,013	2,07	2,867	0,034	1,20	3,514	0,037	1,05
3208-63	4,303	0,009	0,21	0,412	0,009	2,07	2,410	0,029	1,20	2,822	0,030	1,07
3203-73	4,824	0,010	0,21	0,474	0,010	2,07	2,533	0,030	1,20	3,006	0,032	1,06
3191-82	5,313	0,011	0,21	0,535	0,011	2,07	2,676	0,032	1,20	3,211	0,034	1,06
3198-91	6,042	0,013	0,21	0,592	0,012	2,07	2,810	0,034	1,20	3,402	0,036	1,05
3210-100	6,876	0,014	0,21	0,652	0,013	2,07	2,927	0,035	1,20	3,578	0,038	1,05
3395-70	5,115	0,011	0,21	0,475	0,010	2,07	2,613	0,031	1,20	3,088	0,033	1,06
3410-79	5,949	0,013	0,21	0,534	0,011	2,07	2,695	0,032	1,20	3,230	0,034	1,06
3401-88	6,687	0,014	0,21	0,594	0,012	2,07	2,820	0,034	1,20	3,414	0,036	1,05
3404-92	7,442	0,016	0,21	0,625	0,013	2,06	2,946	0,035	1,20	3,571	0,038	1,05
3400-100	8,168	0,017	0,21	0,678	0,014	2,07	3,087	0,037	1,20	3,766	0,040	1,05
3569-72	6,359	0,013	0,21	0,534	0,011	2,07	2,744	0,033	1,20	3,278	0,035	1,06
3592-75	7,100	0,015	0,21	0,563	0,012	2,07	2,883	0,034	1,20	3,445	0,036	1,06
3608-84	7,738	0,016	0,21	0,628	0,013	2,07	3,000	0,036	1,20	3,628	0,038	1,05
3591-95	8,338	0,017	0,21	0,707	0,015	2,07	3,139	0,038	1,20	3,845	0,040	1,05
3637-100	8,665	0,018	0,21	0,746	0,015	2,07	3,267	0,039	1,20	4,013	0,042	1,05

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 44 – Potências de recuperação térmica parciais

N - carga (rpm-%)	P _{hr,HE-1}			P _{hr,HE-2}			P _{hr,a}			P _{hr,g}		
	(kW)	±(kW)	±(%)	(kW)	±(kW)	±(%)	(kW)	±(kW)	±(%)	(kW)	±(kW)	±(%)
1998-0	0,423	0,005	1,20	0,411	0,005	1,20	0,834	0,010	1,20	0,159	0,002	1,23
2026-21	0,460	0,006	1,20	0,464	0,006	1,20	0,924	0,011	1,20	0,188	0,002	1,22
2001-42	0,495	0,006	1,20	0,515	0,006	1,20	1,010	0,012	1,20	0,228	0,003	1,21
1998-61	0,552	0,007	1,20	0,578	0,007	1,20	1,129	0,014	1,20	0,303	0,004	1,21
2029-81	0,602	0,007	1,20	0,646	0,008	1,20	1,248	0,015	1,20	0,376	0,005	1,20
2023-100	0,659	0,008	1,20	0,700	0,008	1,20	1,360	0,016	1,20	0,472	0,006	1,20
2179-35	0,513	0,006	1,20	0,552	0,007	1,20	1,064	0,013	1,20	0,258	0,003	1,21
2173-51	0,552	0,007	1,20	0,589	0,007	1,20	1,141	0,014	1,20	0,320	0,004	1,20
2178-69	0,591	0,007	1,20	0,646	0,008	1,20	1,238	0,015	1,20	0,393	0,005	1,20
2183-84	0,659	0,008	1,20	0,708	0,008	1,20	1,367	0,016	1,20	0,468	0,006	1,20
2198-100	0,688	0,008	1,20	0,756	0,009	1,20	1,444	0,017	1,20	0,577	0,007	1,20
2426-45	0,533	0,006	1,20	0,611	0,007	1,20	1,144	0,014	1,20	0,358	0,004	1,20
2425-61	0,553	0,007	1,20	0,647	0,008	1,20	1,199	0,014	1,20	0,435	0,005	1,20
2398-72	0,663	0,008	1,20	0,712	0,009	1,20	1,374	0,016	1,20	0,506	0,006	1,20
2423-87	0,706	0,008	1,20	0,774	0,009	1,20	1,480	0,018	1,20	0,601	0,007	1,20
2436-100	0,737	0,009	1,20	0,815	0,010	1,20	1,552	0,019	1,20	0,695	0,008	1,20
2615-51	0,624	0,007	1,20	0,706	0,008	1,20	1,330	0,016	1,20	0,458	0,006	1,20
2620-65	0,617	0,007	1,20	0,739	0,009	1,20	1,356	0,016	1,20	0,550	0,007	1,20
2613-77	0,728	0,009	1,20	0,812	0,010	1,20	1,540	0,018	1,20	0,601	0,007	1,20
2618-89	0,729	0,009	1,20	0,828	0,010	1,20	1,557	0,019	1,20	0,698	0,008	1,20
2620-100	0,781	0,009	1,20	0,885	0,011	1,20	1,666	0,020	1,20	0,789	0,009	1,20
2789-57	0,685	0,008	1,20	0,773	0,009	1,20	1,458	0,017	1,20	0,569	0,007	1,20
2802-69	0,738	0,009	1,20	0,833	0,010	1,20	1,570	0,019	1,20	0,638	0,008	1,20
2809-80	0,683	0,008	1,20	0,852	0,010	1,20	1,535	0,018	1,20	0,740	0,009	1,20
2831-90	0,738	0,009	1,20	0,897	0,011	1,20	1,635	0,020	1,20	0,837	0,010	1,20
2805-100	0,804	0,010	1,20	0,946	0,011	1,20	1,751	0,021	1,20	0,923	0,011	1,20
3002-63	0,750	0,009	1,20	0,850	0,010	1,21	1,600	0,019	1,20	0,695	0,010	1,41
3003-73	0,766	0,009	1,20	0,781	0,010	1,31	1,547	0,019	1,23	0,896	0,016	1,74
3008-83	0,805	0,010	1,20	0,954	0,011	1,20	1,759	0,021	1,20	0,855	0,011	1,27
2998-91	0,814	0,010	1,20	0,996	0,012	1,21	1,810	0,022	1,20	0,937	0,013	1,41
3008-100	0,832	0,010	1,20	0,940	0,011	1,21	1,772	0,021	1,20	1,094	0,015	1,35
3208-63	0,777	0,009	1,20	0,857	0,010	1,20	1,634	0,020	1,20	0,776	0,009	1,20
3203-73	0,789	0,009	1,20	0,895	0,011	1,20	1,683	0,020	1,20	0,849	0,010	1,20
3191-82	0,814	0,010	1,20	0,929	0,011	1,20	1,743	0,021	1,20	0,933	0,011	1,20
3198-91	0,826	0,010	1,20	0,957	0,011	1,20	1,783	0,021	1,20	1,027	0,012	1,20
3210-100	0,835	0,010	1,20	0,981	0,012	1,20	1,816	0,022	1,20	1,111	0,013	1,20
3395-70	0,808	0,010	1,20	0,928	0,011	1,20	1,736	0,021	1,20	0,878	0,011	1,20
3410-79	0,816	0,010	1,20	0,925	0,011	1,20	1,741	0,021	1,20	0,955	0,011	1,20
3401-88	0,820	0,010	1,20	0,949	0,011	1,20	1,769	0,021	1,20	1,050	0,013	1,20
3404-92	0,828	0,010	1,20	0,973	0,012	1,20	1,801	0,022	1,20	1,144	0,014	1,20
3400-100	0,847	0,010	1,20	1,010	0,012	1,20	1,857	0,022	1,20	1,230	0,015	1,20
3569-72	0,813	0,010	1,20	0,932	0,011	1,20	1,744	0,021	1,20	1,000	0,012	1,20
3592-75	0,835	0,010	1,20	0,961	0,012	1,20	1,796	0,021	1,20	1,087	0,013	1,20
3608-84	0,839	0,010	1,20	0,978	0,012	1,20	1,817	0,022	1,20	1,183	0,014	1,20
3591-95	0,850	0,010	1,20	1,024	0,012	1,20	1,874	0,022	1,20	1,265	0,015	1,20
3637-100	0,860	0,010	1,20	1,055	0,013	1,20	1,915	0,023	1,20	1,352	0,016	1,20

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 45 – Eficiências

N - carga (rpm-%)	η_{el} (%)	Incertezas		$\eta_{hr,tot}$ (%)	Incertezas		FU (%)	Incerteza	
		\pm (%)	\pm (%)		\pm (%)	\pm (%)		\pm (%)	\pm (%)
1998-0	0,00	0,00	-	44,98	0,03	0,06	44,98	0,03	0,06
2026-21	3,29	0,63	19,13	50,80	0,02	0,05	54,09	0,63	1,16
2001-42	6,21	0,33	5,36	53,68	0,02	0,04	59,89	0,33	0,56
1998-61	7,74	0,27	3,45	52,82	0,02	0,04	60,57	0,27	0,44
2029-81	8,33	0,25	2,98	48,73	0,02	0,05	57,06	0,25	0,44
2023-100	8,67	0,24	2,75	46,05	0,03	0,06	54,72	0,24	0,44
2179-35	5,69	0,36	6,39	52,32	0,02	0,04	58,01	0,36	0,63
2173-51	7,10	0,29	4,10	48,93	0,02	0,05	56,03	0,29	0,52
2178-69	7,99	0,26	3,24	45,95	0,03	0,06	53,94	0,26	0,48
2183-84	8,50	0,24	2,86	44,81	0,03	0,06	53,31	0,24	0,46
2198-100	8,75	0,24	2,70	42,73	0,03	0,07	51,48	0,24	0,46
2426-45	6,43	0,32	5,00	46,63	0,03	0,06	53,06	0,32	0,61
2425-61	7,79	0,27	3,43	45,09	0,03	0,06	52,87	0,27	0,51
2398-72	7,93	0,26	3,30	44,77	0,03	0,06	52,70	0,26	0,50
2423-87	8,46	0,24	2,90	43,74	0,03	0,06	52,20	0,25	0,47
2436-100	8,60	0,24	2,80	41,82	0,03	0,07	50,41	0,24	0,48
2615-51	7,52	0,27	3,65	49,97	0,02	0,05	57,48	0,28	0,48
2620-65	8,61	0,24	2,78	47,81	0,03	0,05	56,43	0,24	0,43
2613-77	9,06	0,23	2,52	47,95	0,03	0,05	57,00	0,23	0,40
2618-89	9,18	0,23	2,45	44,22	0,03	0,06	53,40	0,23	0,42
2620-100	9,25	0,22	2,42	43,30	0,03	0,06	52,55	0,23	0,43
2789-57	8,77	0,24	2,68	52,44	0,02	0,04	61,22	0,24	0,39
2802-69	9,37	0,22	2,36	50,55	0,02	0,05	59,92	0,22	0,37
2809-80	9,98	0,21	2,08	48,16	0,02	0,05	58,13	0,21	0,36
2831-90	10,07	0,21	2,04	46,95	0,03	0,05	57,02	0,21	0,36
2805-100	9,80	0,21	2,16	44,22	0,03	0,06	54,02	0,21	0,39
3002-63	9,85	0,21	2,14	55,05	0,02	0,04	64,89	0,21	0,33
3003-73	10,07	0,21	2,05	51,77	0,02	0,04	61,84	0,21	0,34
3008-83	10,18	0,20	2,00	49,62	0,02	0,05	59,80	0,21	0,34
2998-91	9,95	0,21	2,09	46,27	0,03	0,06	56,22	0,21	0,37
3008-100	9,68	0,21	2,21	42,88	0,03	0,07	52,56	0,22	0,41
3208-63	9,58	0,22	2,26	56,00	0,02	0,04	65,57	0,22	0,33
3203-73	9,82	0,21	2,15	52,50	0,02	0,04	62,32	0,21	0,34
3191-82	10,06	0,21	2,05	50,37	0,02	0,05	60,43	0,21	0,34
3198-91	9,80	0,21	2,16	46,51	0,03	0,06	56,30	0,21	0,38
3210-100	9,48	0,22	2,31	42,57	0,03	0,07	52,05	0,22	0,42
3395-70	9,28	0,22	2,40	51,09	0,02	0,05	60,38	0,22	0,37
3410-79	8,98	0,23	2,57	45,31	0,03	0,06	54,29	0,23	0,43
3401-88	8,88	0,23	2,63	42,16	0,03	0,07	51,05	0,24	0,46
3404-92	8,40	0,25	2,92	39,58	0,03	0,08	47,99	0,25	0,52
3400-100	8,31	0,25	2,99	37,80	0,03	0,08	46,10	0,25	0,54
3569-72	8,40	0,25	2,94	43,16	0,03	0,06	51,55	0,25	0,48
3592-75	7,92	0,26	3,29	40,60	0,03	0,07	48,52	0,26	0,54
3608-84	8,11	0,25	3,14	38,77	0,03	0,08	46,88	0,26	0,55
3591-95	8,47	0,24	2,89	37,64	0,03	0,08	46,12	0,25	0,54
3637-100	8,61	0,24	2,79	37,70	0,03	0,08	46,32	0,24	0,52

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 46 – Relação $P_{el}/P_{hr,tot}$ e consumos específicos

N - carga (rpm-%)	$P_{el}/P_{hr,tot}$ (%)	Incertezas		SFC _{tot} (g/kJ)	Incertezas		SFC _{el} (g/kJ)	Incerteza	
		±(%)	±(%)		±(g/kJ)	±(%)		±(g/kJ)	±(%)
1998-0	0,00	-	-	0,055	0,002	3,64	-	-	-
2026-21	6,48	0,32	4,94	0,046	0,002	5,25	0,756	0,000	0,02
2001-42	11,57	0,18	1,55	0,042	0,003	6,69	0,401	0,000	0,07
1998-61	14,66	0,14	0,97	0,041	0,003	8,06	0,321	0,000	0,13
2029-81	17,10	0,12	0,71	0,044	0,004	8,88	0,299	0,001	0,19
2023-100	18,82	0,11	0,59	0,045	0,004	9,69	0,287	0,001	0,24
2179-35	10,87	0,19	1,75	0,043	0,003	6,98	0,437	0,000	0,07
2173-51	14,52	0,14	0,99	0,044	0,003	7,73	0,350	0,000	0,12
2178-69	17,39	0,12	0,69	0,046	0,004	8,46	0,311	0,001	0,19
2183-84	18,97	0,11	0,58	0,047	0,004	9,49	0,293	0,001	0,24
2198-100	20,48	0,10	0,50	0,048	0,005	10,24	0,284	0,001	0,30
2426-45	13,78	0,15	1,09	0,047	0,004	7,47	0,387	0,000	0,11
2425-61	17,27	0,12	0,70	0,047	0,004	8,28	0,320	0,001	0,18
2398-72	17,72	0,12	0,66	0,047	0,004	9,53	0,314	0,001	0,22
2423-87	19,34	0,11	0,56	0,048	0,005	10,66	0,294	0,001	0,28
2436-100	20,55	0,10	0,49	0,049	0,006	11,18	0,289	0,001	0,32
2615-51	15,04	0,14	0,92	0,043	0,004	9,74	0,331	0,001	0,17
2620-65	18,02	0,12	0,64	0,044	0,005	10,46	0,289	0,001	0,24
2613-77	18,89	0,11	0,58	0,044	0,005	11,95	0,275	0,001	0,30
2618-89	20,76	0,10	0,48	0,047	0,006	11,95	0,271	0,001	0,35
2620-100	21,36	0,10	0,46	0,047	0,006	12,98	0,269	0,001	0,40
2789-57	16,73	0,12	0,74	0,041	0,005	11,91	0,284	0,001	0,24
2802-69	18,54	0,11	0,61	0,042	0,005	13,05	0,265	0,001	0,32
2809-80	20,71	0,10	0,49	0,043	0,006	13,15	0,249	0,001	0,39
2831-90	21,46	0,10	0,45	0,044	0,006	14,19	0,247	0,001	0,44
2805-100	22,16	0,09	0,43	0,046	0,007	14,60	0,254	0,001	0,48
3002-63	17,89	0,12	0,65	0,038	0,006	14,55	0,253	0,001	0,34
3003-73	19,44	0,11	0,55	0,040	0,006	15,05	0,247	0,001	0,40
3008-83	20,51	0,10	0,50	0,042	0,006	15,55	0,244	0,001	0,45
2998-91	21,52	0,10	0,45	0,044	0,007	15,58	0,250	0,001	0,49
3008-100	22,58	0,09	0,41	0,047	0,007	15,31	0,257	0,001	0,52
3208-63	17,10	0,12	0,71	0,038	0,006	15,34	0,260	0,001	0,33
3203-73	18,70	0,11	0,60	0,040	0,006	15,53	0,253	0,001	0,39
3191-82	19,97	0,10	0,52	0,041	0,007	16,22	0,247	0,001	0,45
3198-91	21,07	0,10	0,47	0,044	0,007	15,88	0,254	0,001	0,48
3210-100	22,26	0,09	0,42	0,048	0,007	15,47	0,263	0,001	0,51
3395-70	18,17	0,11	0,63	0,041	0,006	15,49	0,268	0,001	0,37
3410-79	19,82	0,11	0,53	0,046	0,007	14,62	0,277	0,001	0,40
3401-88	21,07	0,10	0,47	0,049	0,007	14,47	0,280	0,001	0,44
3404-92	21,23	0,10	0,46	0,052	0,007	14,26	0,296	0,001	0,44
3400-100	21,97	0,09	0,43	0,054	0,008	14,42	0,300	0,001	0,47
3569-72	19,45	0,11	0,55	0,048	0,007	14,15	0,296	0,001	0,38
3592-75	19,51	0,11	0,55	0,051	0,007	13,91	0,314	0,001	0,37
3608-84	20,93	0,10	0,48	0,053	0,008	14,22	0,307	0,001	0,43
3591-95	22,51	0,09	0,41	0,054	0,008	14,76	0,294	0,001	0,50
3637-100	22,84	0,09	0,40	0,054	0,008	15,50	0,289	0,002	0,54

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 47 – Estimativa das perdas nos fluxos de ar e gases de exaustão

N - carga (rpm-%)	$P_{t,a}$ (kW)	$P_{t,a}/P_{t,tot}$ (%)	$P_{t,a}/P_{hr,a}$ (%)	$P_{t,g}$ (kW)	$P_{t,g}/P_{t,tot}$ (%)	$P_{t,g}/P_{hr,g}$ (%)	$P_{t,tot}$ (kW)	$P_{t,tot}/P_{hr,tot}$ (%)
1998-0	0,482	98,7	63,5	0,006	1,3	4,0	0,488	49,2
2026-21	0,536	98,4	63,9	0,009	1,6	4,7	0,545	49,1
2001-42	0,581	97,4	63,2	0,016	2,6	6,8	0,596	48,1
1998-61	0,621	96,8	60,4	0,021	3,2	6,9	0,641	44,8
2029-81	0,670	95,0	59,1	0,035	5,0	9,4	0,706	43,5
2023-100	0,696	94,2	56,3	0,043	5,8	9,0	0,738	40,3
2179-35	0,627	97,9	64,8	0,013	2,1	5,1	0,640	48,4
2173-51	0,659	97,4	63,5	0,018	2,6	5,5	0,676	46,3
2178-69	0,718	96,6	63,8	0,025	3,4	6,5	0,743	45,6
2183-84	0,731	95,6	58,8	0,034	4,4	7,2	0,765	41,7
2198-100	0,811	94,4	61,8	0,048	5,6	8,4	0,860	42,5
2426-45	0,746	97,5	71,8	0,019	2,5	5,3	0,765	50,9
2425-61	0,802	97,4	73,6	0,021	2,6	4,9	0,823	50,4
2398-72	0,793	95,7	63,5	0,035	4,3	7,0	0,828	44,1
2423-87	0,868	95,1	64,5	0,045	4,9	7,4	0,913	43,9
2436-100	0,935	94,6	66,3	0,053	5,4	7,7	0,988	44,0
2615-51	0,867	97,3	71,7	0,024	2,7	5,2	0,891	49,8
2620-65	0,978	97,4	79,3	0,026	2,6	4,7	1,003	52,6
2613-77	0,940	95,6	67,1	0,044	4,4	7,3	0,983	45,9
2618-89	0,977	94,4	69,0	0,057	5,6	8,2	1,034	45,9
2620-100	1,108	93,8	73,2	0,073	6,2	9,3	1,181	48,1
2789-57	0,953	96,8	71,9	0,031	3,2	5,5	0,984	48,6
2802-69	1,012	96,4	70,9	0,037	3,6	5,8	1,049	47,5
2809-80	1,119	94,4	80,2	0,066	5,6	9,0	1,186	52,1
2831-90	1,210	93,5	81,4	0,084	6,5	10,1	1,295	52,4
2805-100	1,260	92,9	79,2	0,097	7,1	10,5	1,356	50,7
3002-63	1,059	94,2	72,8	0,065	5,8	9,4	1,124	49,0
3003-73	1,139	93,3	81,0	0,081	6,7	9,1	1,220	50,0
3008-83	1,235	93,0	77,2	0,093	7,0	10,8	1,327	50,8
2998-91	1,324	92,4	80,5	0,110	7,6	11,7	1,434	52,2
3008-100	1,429	92,0	88,7	0,124	8,0	11,3	1,553	54,2
3208-63	1,098	93,5	73,9	0,077	6,5	9,9	1,174	48,7
3203-73	1,198	93,3	78,3	0,086	6,7	10,1	1,284	50,7
3191-82	1,270	92,6	80,1	0,101	7,4	10,9	1,371	51,2
3198-91	1,372	92,6	84,6	0,110	7,4	10,7	1,481	52,7
3210-100	1,471	92,0	89,1	0,128	8,0	11,5	1,598	54,6
3395-70	1,241	93,1	78,6	0,092	6,9	10,5	1,333	51,0
3410-79	1,295	92,6	81,9	0,103	7,4	10,8	1,398	51,9
3401-88	1,386	92,0	86,2	0,120	8,0	11,4	1,506	53,4
3404-92	1,492	91,4	91,1	0,140	8,6	12,2	1,632	55,4
3400-100	1,583	90,8	93,7	0,161	9,2	13,1	1,744	56,5
3569-72	1,342	92,6	84,6	0,107	7,4	10,7	1,449	52,8
3592-75	1,448	92,0	88,7	0,127	8,0	11,7	1,575	54,6
3608-84	1,539	91,6	93,2	0,141	8,4	11,9	1,680	56,0
3591-95	1,636	90,9	96,0	0,164	9,1	13,0	1,800	57,3
3637-100	1,624	89,2	93,3	0,196	10,8	14,5	1,820	55,7

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quadro 3 – Resumo dos dados dos artigos da RSL

Equipamento	Artigo	P_{mec} (kW)	η_{mec} (%)	P_f (kW)	P_{el} (kW)	$P_{hr,tot}$ (kW)	P_{net} (kW)	η_{el} (%)	$\eta_{hr,tot}$ (%)	FU (%)	m (kg)	V_{desl} (cm ³)	Ruído (dBA)	Comb	Arref	Nº cil	
Honda micro CHP (mercado alemão)	Thiem, Takeishi e Miwa (2011)				1	2,5		26,3	65,7	92	68		46	GN	Água	1	
Honda Ecowill	Taie, <i>et al.</i> (2018)		27,2		1,18	2,55		23,5	51,1	74,5				GN	Água	1	
Honda Ecowill	Roselli, <i>et al.</i> (2011)			4,4	1	2,8		22,5	63	85,5	83	163	44	GN	Água	1	
Honda Ecowill	Sibilio, <i>et al.</i> (2007)			5	1	3,2		21,3	65	86,3		163		GN	Água	1	
Honda Ecowill	Ippolito e Venturini (2017), (2017B), (2018) e (2019)				1	3,25		20	65	85				GN	Água	1	
Não identificado	Entchev, <i>et al.</i> (2013)			5,4	1	3,25		18,5	54,6	74,6				GN	Água		
Ecopower	Sibilio, <i>et al.</i> (2007)			19	4,7	12,5		25	65	90	390	270	56	GN	Água	1	
Ecopower	Thomas (2008)				4,7	12,5		24,7		88,9	390	272				Água	1
Ecopower	Taie e Hagen (2019)		29,3		4,5	12,4		24,4		94,5				GN	Água	1	
Ecopower e4.7	Roselli, <i>et al.</i> (2011)			18,9	4,7	12,5		24,8	66	90,9	390	270	56	GN	Água	1	
Home Power VectorCogen HP-3	Sibilio, <i>et al.</i> (2007)			7,8	3	5,3		34	43	77	76		68	GN	Água	1	
Home Power VectorCogen HP-5	Sibilio, <i>et al.</i> (2007) Bianchi, De Pascale e Melino (2013)			17,6	5	7,3		28,4	41,6	70	156	351	64	GN	Água	1	
Senertec Dachs HKA G 5,0	Sibilio, <i>et al.</i> (2007) Roselli, <i>et al.</i> (2011)			19,6	5	12,3		26	63	89	520	579	56	GN	Água	1	
Senertec Dachs G5.0 Kondenser	Bianchi, De Pascale e Melino (2013)				5	14,8		26	74	100				GN	Água	1	
Senertec Dachs HKA H 5,3	Sibilio, <i>et al.</i> (2007) Roselli, <i>et al.</i> (2011)			17,9	5,3	10,4		30	59	89	520	579	58	Biodiesel	Água	1	
Senertec Dachs HKA G 5,5	Sibilio, <i>et al.</i> (2007) Rosato, Sibilio e Ciampi (2013) De Paepe, D'Herdt e Mertens (2006) Roselli, <i>et al.</i> (2011)			20,5	5,5	12,5		27	61	88	520	579	56	GN	Água	1	
Senertec HKA G 5.5	Ippolito e Venturini (2017), (2017B), (2018) e (2019)				5,5	14,7		27	72					GN	Água	1	

Continua

Senertec Dachs HKA G 5,5	Thomas (2008)				5,5	12,5		27,7		88,5	520	580		GN	Água	1
Tedom Micro S8 AP	Sibilio, <i>et al.</i> (2007)			31,9	8	21		25	65,8	90,8				GN	Água	
Yanmar CP5VB	Roselli, <i>et al.</i> (2011)			17,2	5	9,6		29	55,8	84,8	410	699	51	GN		3
Yanmar CP10VB1	Roselli, <i>et al.</i> (2011)			31,4	9,9	16,8		31,5	53,5	85	790	1642	54	GN		3
Aisin Seiki	Sibilio, <i>et al.</i> (2007) Roselli, <i>et al.</i> (2011) Rosato e Sibilio (2012), (2013) e (2013B)			22,6	6	13,5		26,5	59,5	86	465		60	GN	Água	3
Aisin GECC60A2 NR/P	Angrisani, Roselli e Sasso (2010) Roselli, <i>et al.</i> (2011) Angrisani, <i>et al.</i> (2012) Rosato, Sibilio e Ciampi (2013) Rosato e Sibilio (2013B)				6	11,7		28,8	56,2	85		952		GN	Água	3
Micro CHP C-3	Possidente, <i>et al.</i> (2006)			22,7	6,00	13,5		26,5	59,5	86		952		GN	Água	3
Micro CHP E-1	Possidente, <i>et al.</i> (2006)				3	10,5		16,4	57,4	73,8		359		GN	Ar	1
Micro CHP E-2	Possidente, <i>et al.</i> (2006)				1,67	4		16,3	38,8	55,1		226		GN	Ar	1
Micro CHP E-3	Rey, <i>et al.</i> (2015) Rey, <i>et al.</i> (2016) Míguez, <i>et al.</i> (2004)	9,6			0,653	5,414						359		GN	Água	2
Micro CHP E-4	Perrone, <i>et al.</i> (2021)	11	34,7		6,7	11,3		31,1	52,2	83,3		996		Biodiesel	Água	1
Micro CHP E-5	Smith e Few (2001)			6,53	0,98	2,89		15	44,3	59,3				GN	Ar	1
Micro CHP E-6	Lin, <i>et al.</i> (2007)	9,5				11,34	17,83	22,1		67,3		1270		Diesel	Ar	2
Micro CHP E-7	Khatri, <i>et al.</i> (2010)	3,7								86,21		553		Diesel	Água	1
Micro CHP E-8	Caligiuri, <i>et al.</i> (2022)				3,9	5,6		29	42	71		290		Biodiesel	Água	1
Micro CHP E-9	Przybyła, <i>et al.</i> (2022)	23			5			31,7		91		747		GN/GLP	Água	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE F – PROTOCOLO PRISMA DA RSL

Seção e tópico	Item	Item da lista de verificação
TÍTULO		
Título	1	Avaliação de um sistema micro CHP experimental para veículos recreativos
RESUMO		
Resumo	2	No intuito de verificar o atual desenvolvimento da tecnologia micro CHP e identificar dispositivos adaptáveis a veículos recreativos (RVs), foi realizada uma revisão sistemática de literatura (RSL), abrangendo artigos científicos sobre sistemas combinados de calor e energia. Esta RSL foi precedida por uma busca por documentos sobre cogeração e aproveitamento de energia em RVs, tanto em bases científicas quanto em bancos de propriedade intelectual. Identificou-se uma lacuna de pesquisa sobre dispositivos micro CHP para RVs.
INTRODUÇÃO		
Justificativa	3	São abundantes os estudos sobre micro CHP residenciais, mas neste estudo pretende-se investigar quais destes dispositivos poderiam ser utilizados em RVs.
Objetivos	4	Para realizar a revisão sistemática da literatura, foi definida a questão de pesquisa, a qual se deseja responder com este trabalho: <i>“A partir do atual desenvolvimento da tecnologia micro CHP com MCI, quais os parâmetros de desempenho dos equipamentos cujas características se assemelham ao que seria necessário para RVs?”</i> O objetivo desta questão é a busca de embasamento teórico relativo aos sistemas combinados de calor e energia elétrica que utilizam como máquina primária um MCI, e a avaliação dos parâmetros de desempenho destes dispositivos, verificando a compatibilidade de utilização da tecnologia em RVs.
MÉTODOS		
Critérios de elegibilidade	5	Ver Figura 11
Fontes de informação	6	As pesquisas foram realizadas no dia 24 de novembro de 2023. Nas bases de dados científicos <i>Scopus</i> e <i>Web of Science</i> . A string de busca foi: (<i>"Micro Generation "</i> OR <i>"Micro combined heat and power"</i> OR <i>"micro CHP"</i>) AND (<i>"internal combustion engine"</i> OR <i>"ICE"</i> OR <i>"reciprocating engine"</i>)
Estratégia de busca	7	Os termos foram buscados nos títulos, resumos e palavras-chave. Os resultados foram restringidos a apenas publicações em inglês, apenas trabalhos publicados a partir do ano de 2001 e apenas artigos de revistas ou

Seção e tópico	Item	Item da lista de verificação
		documentos de conferência. O período foi estabelecido a partir de 2001, tendo em vista que antes disso pouco se discutia sobre micro CHP no meio científico.
Processo de seleção	8	Especifique os métodos usados para decidir se um estudo atendeu aos critérios de inclusão da revisão, incluindo quantos revisores examinaram cada registro e cada relatório recuperado, se eles trabalharam de forma independente e, se aplicável, detalhes das ferramentas de automação usadas no processo.
Processo de coleta de dados	9	A coleta de dados foi feita pelo autor desta tese sem utilização de ferramentas específicas, apenas leitura e compreensão dos documentos.
Lista de dados	10a	Potência elétrica, potência térmica, eficiências, fator de utilização, massa dos equipamentos, dimensões.
	10 b	Tipo de arrefecimento, potência mecânica, combustível, tipo de geração elétrica (CC ou CA)
Avaliação do risco de viés dos estudos	11	Revisão por parte dos orientadores
Medidas de efeito	12	Dados relatados conforme publicados pelos autores
Métodos de síntese	13a	Aplicação dos critérios de inclusão e exclusão
	13 b	Os dados dos dispositivos micro CHP foram identificados na leitura dos artigos
	13c	Os dados dos dispositivos micro CHP dos artigos foram apresentados em um quadro resumo em Apêndice
Avaliação de vieses de publicação	14	Documentos sem dados técnicos dos equipamentos ou de avaliações experimentais não foram considerados elegíveis
Avaliação da certeza	15	Publicação dos dados dos dispositivos nas pesquisas
RESULTADOS		
Seleção dos estudos	16	Ver Figura 12

Seção e tópico	Item	Item da lista de verificação
Características dos estudos	17	Ver Quadro 3 do Apêndice E
Risco de viés nos estudos	18	Aplicação dos critérios de inclusão e exclusão.
Resultados de estudos individuais	19	Ver Item 3.3
Resultados das sínteses	20	Ver Item 3.3
Vieses de publicação	21	Documentos sem dados técnicos dos equipamentos ou de avaliações experimentais não foram considerados elegíveis
Certeza da evidência	22	Documentos revisados por periódicos científicos
DISCUSSÃO		
Discussão	23	Ver Item 3.6
OUTRAS INFORMAÇÕES		
Registro e protocolo	24	Esta revisão não foi registrada
Apoio	25	IRFS campus Ibirubá
Interesses conflitantes	26	Não há conflito de Interesses
Disponibilidade de dados, código e outros materiais	27	Publicização desta Tese