

3 Procedimento experimental

3.1 Descrição do teste

No sistema de cogeração com microturbina a gás natural, instalado no Ginásio de esportes da PUC-Rio em fevereiro de 2006, Fig. 18, foram realizados todos os testes experimentais. Os principais dados foram coletados através de um sistema de aquisição e também pelo software da microturbina, dos quais foram posteriormente processados e analisados em diferentes condições de operação da microturbina.



Figura 18 – Ginásio de esportes – PUC-Rio

Através da integração da microturbina com a unidade recuperadora de calor (*URC*) realizou-se o processo de aquecimento da água, que simultaneamente era armazenada em um reservatório térmico, Fig. 19. O uso da água quente foi destinado para o consumo nos chuveiros do Ginásio da PUC-Rio, atendendo um total de 10, onde anteriormente dispunha de 6 chuveiros elétricos.

Para o fornecimento de energia elétrica no processo de cogeração conectou-se a microturbina em paralelo com a rede elétrica da PUC-Rio no modo de operação “Grid Conect”, que tem como principal característica a geração de eletricidade de forma sincronizada à mesma tensão e frequência da rede [24, 25].



Figura 19 – Sistema de cogeração com microturbina a gás natural

Sendo normalmente aplicada para consumo de energia elétrica constante e ininterrupta, modo de operação normal, a microturbina se mostrou mais viável e com um melhor custo x benefício no fornecimento de energia no horário de ponta (de 17:30 às 20:30h) conforme análise econômica apresentada no Apêndice 1.

Durante a geração de energia elétrica, a energia térmica (calor) dos gases quentes liberada na exaustão da microturbina será aproveitada através da unidade recuperadora de calor, onde parte desta energia será transferida para o aquecimento da água, que circula de forma ascendente em um escoamento cruzado [12]. Através do sistema de bombeamento a água será enviada ao reservatório térmico (boiler), localizado no último pavimento do Ginásio, até alcançar a temperatura estabilizada para o processo.

O circuito para a acumulação e distribuição de água quente do sistema de cogeração está ilustrado na Fig. 20 e Apêndice 2.

O circuito fechado (unidade recuperadora / reservatório térmico) é composto de duas linhas de tubulação de cobre, sendo de \varnothing 54mm (2") para a entrada de água e de \varnothing 35mm (1 1/4") para a saída, isolados com polietileno expandido e protegidos por folhas de alumínio corrugado. A alimentação de água fria no circuito é feita através de um pequeno reservatório de 250 litros, por gravidade e à pressão atmosférica.

A distribuição de água quente para consumo está projetada para atender num total de 10 chuveiros nos banheiros masculino e feminino, 5 em cada, Fig. 21. Para esta linha foi dimensionado um ramal principal com uma tubulação de cobre \varnothing 54mm (2") e dois ramais secundários de \varnothing 22mm (3/4") isolados termicamente com polietileno expandido e protegidos por alumínio.

A mistura da água quente com a fria será feita por um misturador externo em cada chuveiro. No Apêndice 3, apresenta-se a curva do sistema para alimentação da água e armazenamento no circuito da cogeração.

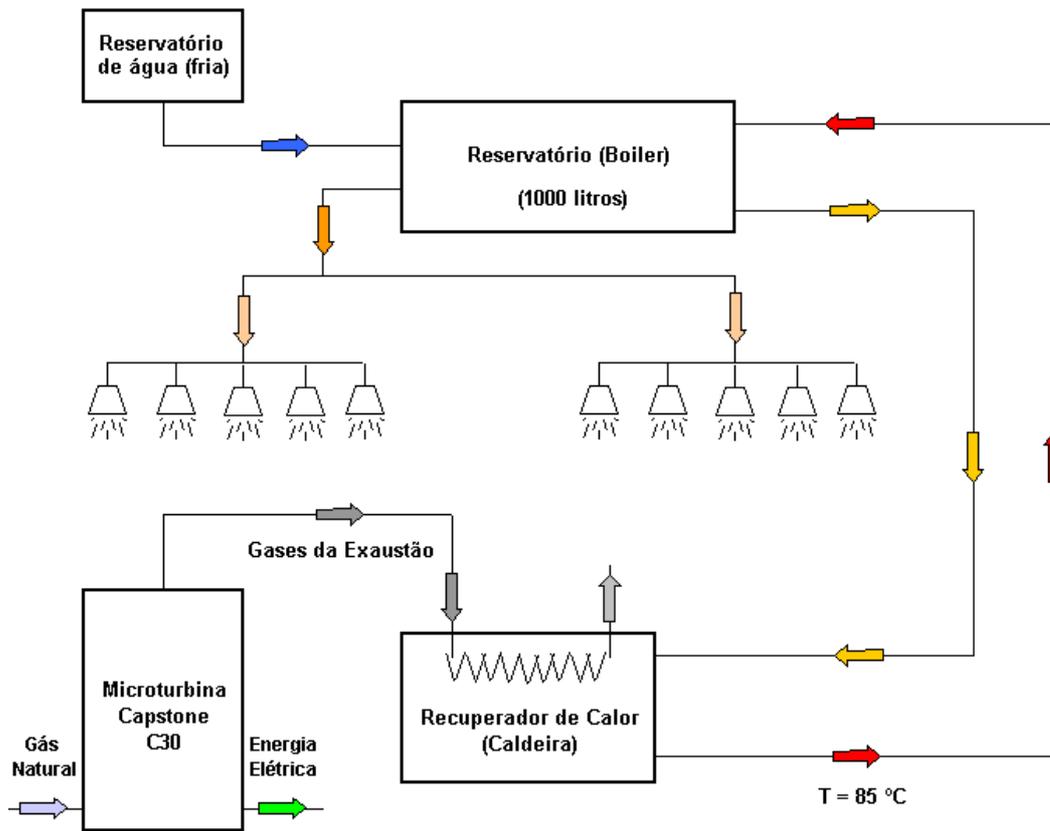
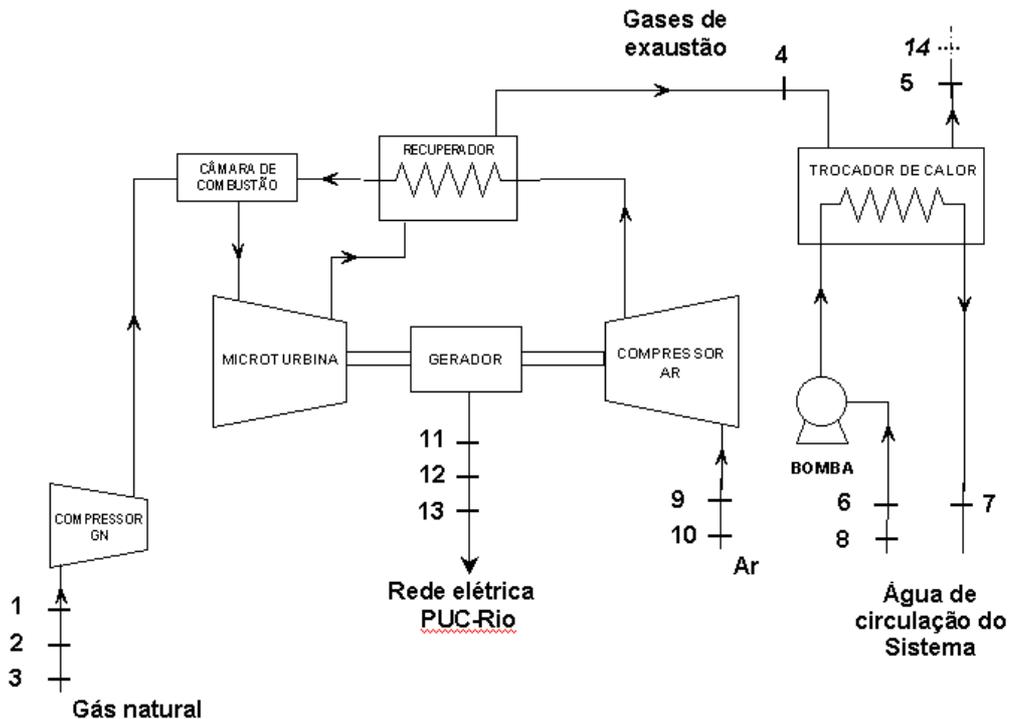


Figura 20 – Diagrama do sistema de cogeração



Figura 21 – Sistema de cogeração - chuveiro

Nas seções a seguir será detalhada a instrumentação utilizada nos equipamentos do sistema de cogeração e para os demais testes pertinentes ao trabalho com as respectivas incertezas. Na Fig. 22 apresenta-se o esquema da instrumentação do sistema de cogeração.



- 1 – Pressão do gás natural (p_{GN})
- 2 – Vazão do gás natural (\dot{V}_{GN})
- 3 – Temperatura do gás natural (T_{GN})
- 4 – Temperatura dos gases de exaustão – entrada no Trocador (T_{g_e})
- 5 – Temperatura dos gases de exaustão – saída no Trocador (T_{g_s})
- 6 – Temperatura da água de circulação – entrada no Trocador (T_{ag_e})
- 7 – Temperatura da água de circulação – saída no Trocador (T_{ag_s})
- 8 – Vazão da água de circulação no sistema (\dot{V}_{ag})
- 9 – Temperatura do ar – entrada no compressor (T_{ar_e})
- 10 – Fluxo de massa do ar – entrada no compressor (\dot{m}_{AR})
- 11 – Potência elétrica (P)
- 12 – Tensão elétrica (V)
- 13 – Frequência elétrica (F)
- 14 – Temperatura ambiente (T_{Amb})

Figura 22 – Esquema da instrumentação do sistema de cogeração

As leituras da maioria dos dados foram feitas manualmente em diferentes sistemas de aquisição conforme mencionadas nas seções subseqüentes.

Em relação à medição de: potência elétrica, temperatura de entrada do ar no compressor e pressão atmosférica foram utilizados os sensores internos da própria microturbina e registrados através de um software específico para a mesma, *Capstone Remote Monitoring System (CRMS)*, com o auxílio de uma porta *interface* serial RS-232, Fig. 23, e um computador, onde os dados foram importados para uma planilha Excel®.

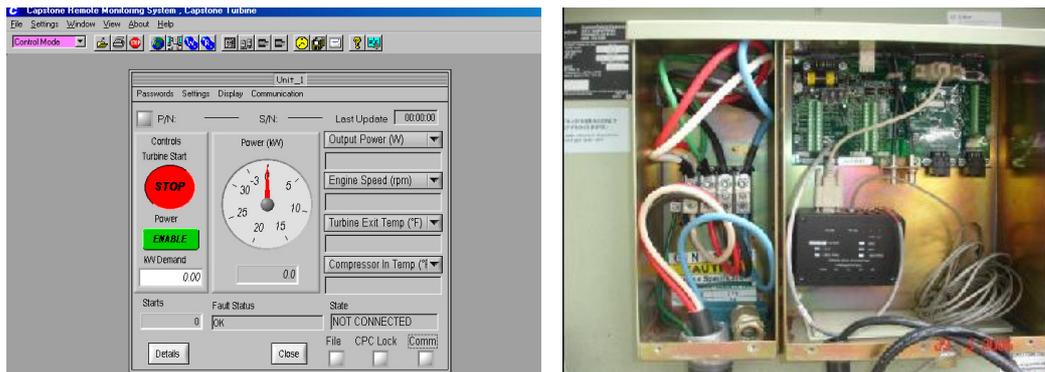


Figura 23 – Software CRMS e Interface RS-232

3.2 Medição dos parâmetros de energia elétrica

Para a medição dos parâmetros relacionados à geração da energia elétrica como: potência elétrica, frequência elétrica e tensão elétrica utilizou-se os sensores internos da própria microturbina com as seguintes especificações conforme apresentadas na Tabela 2 [26]:

Tabela 2 – Especificação dos sensores internos da microturbina C30

Grandeza	Unidade	Exatidão	Fundo de Escala (FE)
Potência elétrica de saída	kW	± 2,0% (típico) ± 3,7% (máximo)	28
Tensão elétrica	V	± 0,6% (típico) ± 1,3% (máximo)	528
Frequência elétrica de saída	Hz	± 0,05% da leitura	--

3.3 Medição de vazão - Gás natural e Água de circulação

Para a medição da vazão do gás natural e da água de circulação na URC foram utilizados medidores de vazão tipo turbina.

O princípio de funcionamento de um medidor de vazão tipo turbina se dá devido ao acionamento de um rotor montado axialmente no interior do medidor através do fluido que escoar na tubulação, a velocidade deste rotor é proporcional à velocidade do escoamento do fluido no processo. Um sensor, acoplado ao corpo do medidor, tem seu campo magnético alterado a cada passagem de uma das pás do rotor, gerando um pulso elétrico que é amplificado e processado na forma de frequência (*Hz*) ou corrente (*mA*).

Para a medição da vazão do gás natural utilizou-se um medidor com as seguintes características mostradas na Tabela 3:

Tabela 3 – Características do medidor de vazão tipo turbina - Gás

Sensor	Turbina
Fabricante	CONTECH
Modelo	SVTG – 3/4"
Nº. série	0204121
Saída	Hz
Alimentação	24 VDC
Linearidade	± 1,1%

Abaixo apresenta-se a curva do Sensor de Vazão tipo Turbina – Gás (SVTG) calibrada pelo fabricante, Fig. 24.

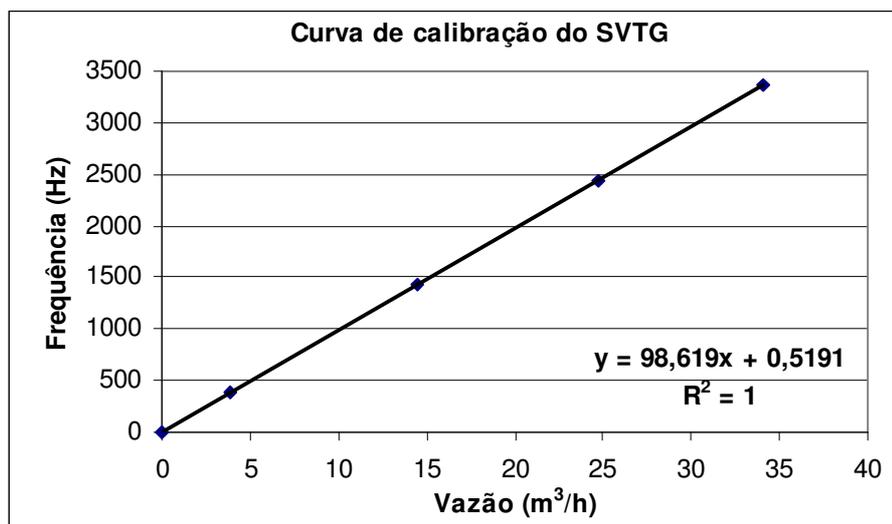


Figura 24 – Curva de calibração do SVTG

Onde na equação ajustada a variável x representa a vazão de referência e a variável y é a frequência lida pelo sensor.

A instrumentação para a medição do gás natural está ilustrada conforme esquema da Fig. 25:



Figura 25 – Instrumentação – vazão, temperatura e pressão do gás natural

Para a medição da vazão da água de circulação na URC utilizou-se um medidor com as seguintes características mostradas na Tabela 4:

Tabela 4 – Características do medidor de vazão tipo turbina – Líquido

Sensor	Turbina
Fabricante	CONTECH
Modelo	SVTL – 1.1/2"
Nº. série	05120008
Saída	Hz
Alimentação	24 VDC
Linearidade	$\pm 1,0\%$

Abaixo apresenta-se a curva do Sensor de Vazão tipo Turbina – Líquido (SVTL) calibrada pelo fabricante, Fig. 26:

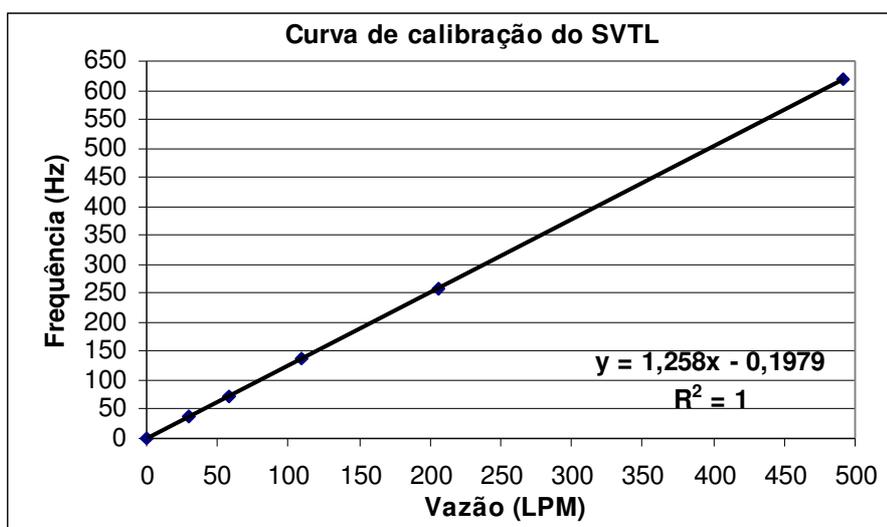


Figura 26 – Curva de calibração do SVTL

Onde na equação ajustada a variável x representa a vazão de referência e a variável y é a frequência lida pelo sensor.

A instrumentação para a medição da vazão da água está ilustrada na Fig. 27:

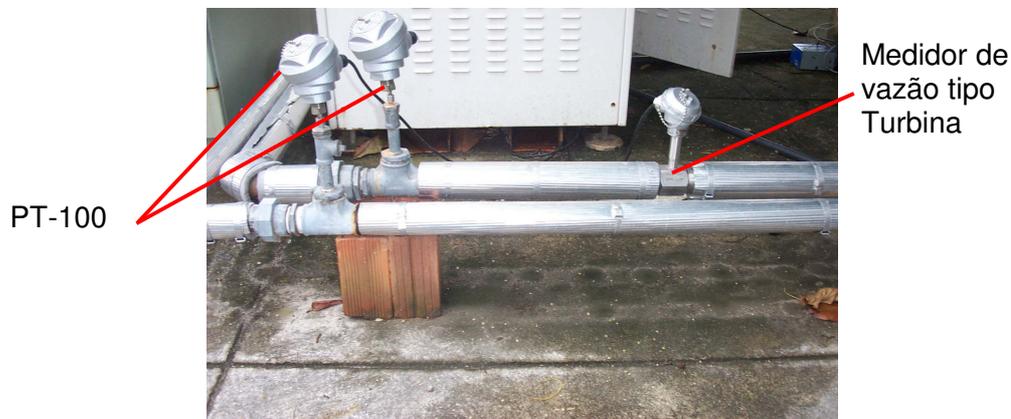


Figura 27 – Instrumentação – vazão e temperatura da água

3.4 Medição de vazão - Água de consumo

Para a medição da vazão da água quente para consumo foi utilizado um hidrômetro na entrada de água fria no reservatório térmico. A leitura do volume suprido de água fria ao sistema, do qual é igual ao volume de água quente utilizada nos chuveiros, foi realizada durante o tempo dos testes padrões (20 minutos) e simultaneamente cronometrada. As leituras para este teste foram feitas manualmente e considerou-se, neste caso, o volume específico da água à temperatura ambiente para referência do teste.

Para o medidor do volume da água de consumo foi adotada uma incerteza de $\pm 2,0\%$ enquanto para o cronômetro adotou-se uma incerteza de $\pm 0,20$ s conforme resumido na Tabela 5:

Tabela 5 – Características do hidrômetro e cronômetro

Medidor 1	Hidrômetro
Incerteza	$\pm 2,0\%$
Medidor 2	Cronômetro
Incerteza	$\pm 0,20$ s

Na Fig. 28 ilustra-se a instrumentação para a medição do consumo da água quente pelo hidrômetro.



Figura 28 – Instrumentação - volume consumo de água quente

3.5 Medição de vazão – Ar (gases) na URC

Para o cálculo da vazão dos gases de exaustão que saem à jusante da URC (Unidade recuperadora de calor), neste caso modelado como ar, utilizou-se uma sonda (Pitot) manual com leitura direta de medição para velocidade (m/s). Como na saída da URC os gases apresentavam grande instabilidade que dificultavam uma medição adequada, projetou-se um dispositivo na forma de bocal com um duto de extensão conforme mostrado na Fig. 29, de modo a uniformizar o escoamento na exaustão [21].

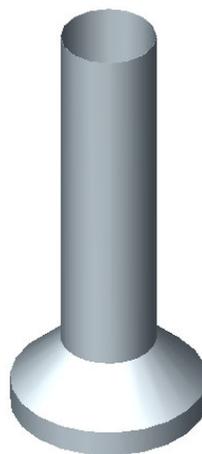


Figura 29 – Bocal e duto de extensão para o escoamento Gases da exaustão

Através da conservação de massa para escoamento incompressível numa seção circular de $\varnothing 127$ mm determinou-se então a vazão do ar. O fluxo de massa na exaustão foi determinado pela massa específica dos gases (ar)

calculada pela equação obtida pelo ajuste de curva do software Excel®, Apêndice 4, em função da temperatura de saída dos gases, possibilitando assim calcular a efetividade da URC.

Para o medidor da velocidade do escoamento dos gases de exaustão foi adotada uma incerteza de $\pm 5,0\%$ e para a leitura do paquímetro para medição do diâmetro da seção obtém-se uma incerteza de $\pm 0,05 \text{ mm}$ conforme resumo na Tabela 6:

Tabela 6 – Características da sonda (Pitot) e paquímetro

Medidor 1	Sonda (Pitot)
Incerteza	$\pm 5,0\%$
Medidor 2	Paquímetro
Incerteza	$\pm 0,05 \text{ mm}$

A seguir na Fig. 30 ilustra-se a sonda (Pitot) utilizada para a medição da velocidade do escoamento.

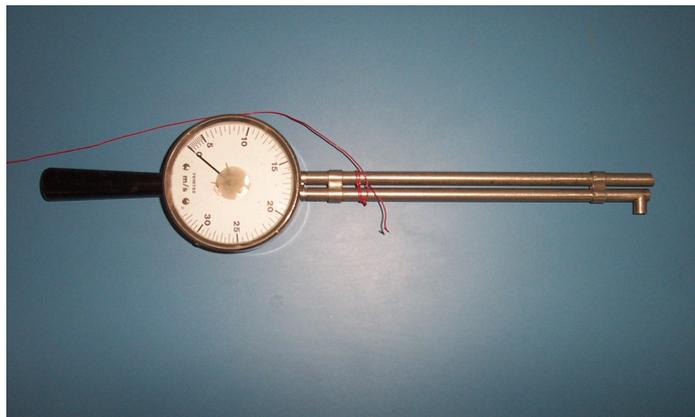


Figura 30 – Sonda (Pitot) - velocidade do gás

3.6 Medição de temperatura

Para a medição da temperatura nos diferentes pontos de estudo no sistema de cogeração foram utilizados os instrumentos detalhados nos parágrafos a seguir.

Na URC as temperaturas de entrada e de saída dos gases de exaustão e, as temperaturas de entrada e de saída da água de circulação foram medidas através de quatro PT-100 (termorresistência) instrumentados conforme mostrado

nas Fig. 27 e 31. Utilizou-se também um PT-100 para medir a temperatura do gás natural conforme ilustrado na bancada de teste do gás natural, Fig. 25.



Figura 31 – Instrumentação – temperatura dos gases de exaustão

O PT-100 é um detector de temperatura por resistência (*RTD – Resistance temperature detectors*), onde tem o seu princípio de operação devido à variação da resistência elétrica dos metais puros e caracterizada por uma variação positiva quase linear na resistência com a temperatura. Para determinar a temperatura utiliza-se geralmente a equação conhecida como *Callendar – Van Dusen*, descrita abaixo, através dos coeficientes mostrados na Tabela 7.

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2) \quad \text{Eq. (53)}$$

Onde:

R_0 : Resistência nominal a 0°C (Ω);

R_T : Resistência à temperatura T (Ω);

T : Temperatura ($^\circ\text{C}$);

A : Coeficiente de ajuste ($^\circ\text{C}^{-1}$);

B : Coeficiente de ajuste ($^\circ\text{C}^{-2}$).

Tabela 7 – Coeficientes da Equação de Callendar – Van Dusen

Constantes	Unidade	DIN 43760 IEC 751
R_0	Ω	100
A	$^\circ\text{C}^{-1}$	$3,90802 * 10^{-3}$
B	$^\circ\text{C}^{-2}$	$-5,80195 * 10^{-7}$

Para a medição da temperatura de entrada do ar no compressor utilizou-se o próprio sensor da microturbina, um termistor, enquanto que para a

temperatura média ambiente utilizou-se os mesmos sensores PT-100 para leitura das temperaturas dos gases de exaustão antes de cada operação na microturbina.

Adotaram-se incertezas de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ para os sensores de temperaturas PT-100 e de $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ para o termistor conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Características dos sensores de temperatura

Sensor	Termorresistência
Fabricante	ECIL
Modelo	Tipo PT-100 Ω
Incerteza	$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$
Sensor (ar_microturbina)	Termistor
Incerteza	$\pm 1,0^{\circ}\text{C}$

As temperaturas da água quente, fria e de mistura durante a simulação nos chuveiros foram medidas com um termopar tipo K e registradas através de um multímetro digital portátil, Fig. 32.

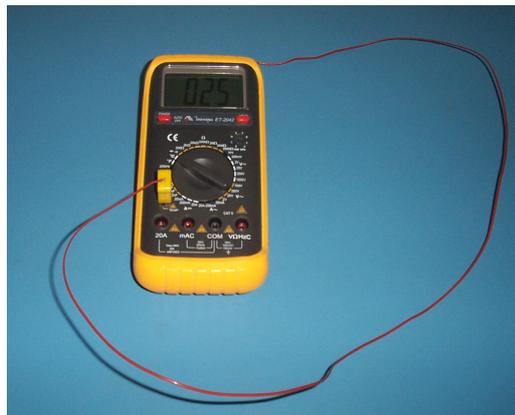


Figura 32 – Multímetro digital portátil

As características do multímetro estão descritas na Tabela 9.

Tabela 9 – Características do Multímetro digital – Temperatura

Instrumento	Multímetro Digital
Fabricante	Minipa
Modelo	ET-2042C
Sensor	Termopar tipo K
Faixa	$- 40^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$
Resolução	1°C
Incerteza	$\pm 1,0\%$

3.7 Medição de pressão

Para a medição da pressão do gás natural utilizou-se um transdutor de pressão conforme montagem ilustrada na bancada de teste do gás na Fig. 25 da seção 3.3.

O transdutor de pressão é um instrumento utilizado no monitoramento contínuo da pressão em processos envolvendo líquidos ou gases. A pressão é medida por meio de um transdutor piezo resistivo que converte a força exercida pelo fluido sobre o diafragma em um sinal diretamente proporcional à sua intensidade para logo então ser enviado a um circuito eletrônico. Um sinal analógico de 4 – 20 mA (a 2 fios) é gerado pelo circuito, sendo proporcional ao valor da pressão.

Na tabela abaixo estão apresentadas as características do transdutor de pressão:

Tabela 10 – Características do transdutor de pressão

Sensor	Transdutor Piezo resistivo
Fabricante	WIKA
Nº. série	3600593
Saída	4 – 20 mA
Pressão	0 – 10 bar
Linearidade	± 0,23% FE (0,0023 MPa)

A seguir apresenta-se a curva do Transdutor de pressão calibrada pelo LPT-PUC.

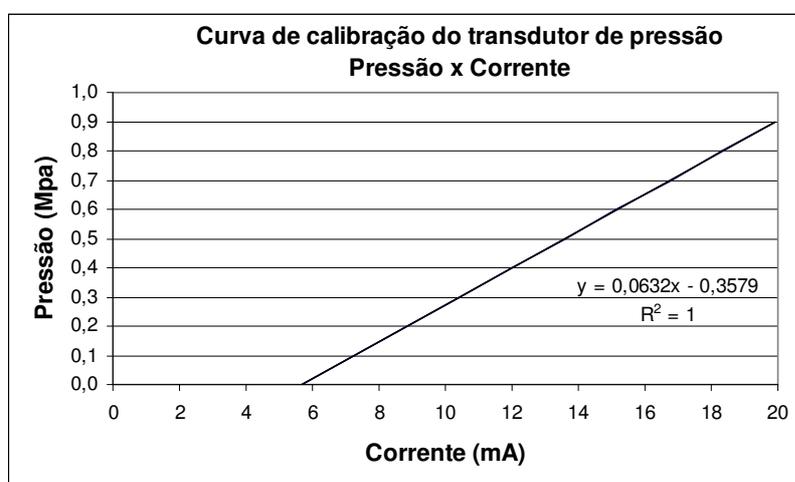


Figura 33 – Curva de calibração do Transdutor de pressão

Onde na equação ajustada a variável x representa a corrente elétrica lida pelo sensor e a variável y é a pressão manométrica.

3.8 Medição de emissão dos gases

Para a medição de emissão dos gases de exaustão da microturbina utilizou-se um analisador de gás portátil marca testo - 350 X/ML constituído por uma unidade de controle e uma caixa analisadora, onde através destes se processaram as análises dos gases captados por uma sonda para gases conforme mostrados na Fig. 34 e detalhados a seguir.



Figura 34 – Analisador de gás – testo 350 X/ML

A Unidade de Controle é um instrumento de medição portátil para inspeções e medições instantâneas no local. A Unidade de Controle é uma das responsáveis pelo controle e programação da Caixa Analisadora, o que pode ser feito também via software.

O princípio de funcionamento da Unidade Analisadora se dá quando a bomba de gases de medição é ativada manual ou automaticamente fazendo com que o gás de combustão passe pela sonda dos gases de combustão até a sua preparação. Dentro da Unidade o gás é resfriado repentinamente entre 4 e 8°C, precipitando a condensação com a mais baixa absorção de NO₂ e SO₂. O condensado é então bombeado a intervalos regulares por uma bomba peristáltica para dentro do tanque de condensação localizado na parte inferior da Unidade.

O gás seco então é bombeado passando através de um filtro de partículas do qual retêm as suas partículas chegando até aos sensores de gás. Neste

processo uma proporção muito pequena dispersa-se nas membranas dos sensores, dos quais emitem um sinal. Então, finalmente o gás de medição excedente sai da Unidade através de um tubo de exaustão.

As leituras dos gases foram feitas manualmente no mostrador da Unidade de Controle. As características do analisador de gás estão descritas na Tabela 11.

Tabela 11 – Características do analisador de gás

Instrumento	Analisador de gás		
Fabricante	testo		
Modelo	350 X/ML		
Sensor	Sonda para amostra padrão - 700mm		
Sonda	Intervalo	Exatidão	Resolução
O ₂	0...+25% Vol. % O ₂	±0,8% do vt (0...+25% Vol. % O ₂)	0,1% Vol. % O ₂ (0...+25% Vol. % O ₂)
CO (H ₂ compensado)	0...+10000 CO	±5,0% do vm (+100...+2000 ppm CO) ±10,0% do vm (+2001...+10000 ppm CO) ±10 ppm CO (0...+99 ppm CO)	1 ppm CO (0...+10000 ppm CO)
CO _{Baixo}	0...+500 CO	±5,0% do vm (+40...+500 ppm CO) ±2 ppm CO (0...+39.9 ppm CO)	0,1 ppm CO (0...+500 ppm CO)
CO ₂	0...CO _{max} Vol. % CO ₂	Calculado do O ₂	0,01% Vol. % CO ₂
NO	0...+3000 NO	±5,0% do vm (+100...+1999,9 ppm NO) ±10,0% do vm (+2000...+3000 ppm NO) ±5 ppm NO (0...+99 ppm NO)	1 ppm NO (0...+3000 ppm CO)
NO _{Baixo}	0...+300 NO	±5,0% do vm (+40...+300 ppm NO) ±2 ppm NO (0...+39.9 ppm NO)	0,1 ppm NO (0...+300 ppm NO)
NO ₂	0...+500 NO ₂	±5,0% do vm (+100...+500 ppm NO ₂) ±5 ppm NO ₂ (0...+99.9 ppm NO ₂)	0,1 ppm NO ₂ (0...+500 ppm NO ₂)
HC (Metano)	100 a 40000 ppm	< 400 ppm (100...4000 ppm) < 10% do vm (> 4000 ppm)	10 ppm

3.9

Medição do fluxo de massa de ar e razão ar/combustível

Os valores diretos para as medidas do fluxo de massa do ar foram obtidos através do software específico da microturbina, *CRMS*, indicada em *lbh* (*libra massa por hora*). Obteve-se também através do mesmo software a medida da

razão ar-combustível para os testes. Embora desconhecendo-se o processo de medição para estes parâmetros adotou-se uma incerteza de $\pm 2\%$ para o fluxo de massa do ar na microturbina.

3.10 Sistema de aquisição de dados

Para a aquisição de dados referente aos sinais dos sensores da bancada de teste da cogeração utilizou-se um multímetro digital multicanal, Fig. 35, com as características descritas na Tabela 12.



Figura 35 – Multímetro digital multicanal

Tabela 12 – Características do Multímetro digital multicanal

Equipamento	Multímetro digital multicanal
Fabricante	Agilent
Modelo	34970A
Aquisição de dados	Unidade de comutação com módulo multiplexador de armadura de 20 canais 34901A

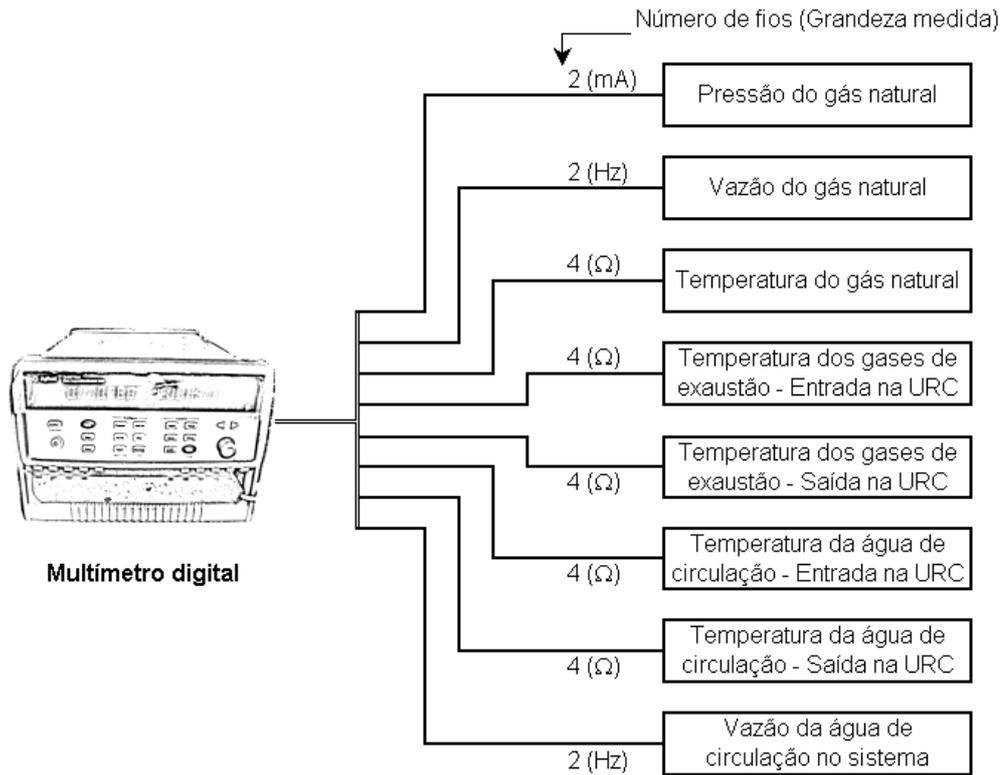
Abaixo ilustra-se uma tabela resumida dos sensores utilizados e o esquema de ligação do sistema de aquisição, Fig. 36.

Tabela 13 – Resumo do Sistema de aquisição

Parâmetro	Sensor	Unidade
Temperatura dos gases de exaustão da microturbina entrando na URC	PT – 100	Ω
Temperatura dos gases de exaustão saindo da URC	PT – 100	Ω
Temperatura de entrada da água na URC	PT – 100	Ω
Temperatura de saída da água na URC	PT – 100	Ω

Tabela 13 – Resumo do Sistema de aquisição (continuação)

Parâmetro	Sensor	Unidade
Temperatura do gás natural	PT – 100	Ω
Vazão do gás natural	Turbina	Hz
Vazão da água de saída da URC	Turbina	Hz
Pressão do gás natural	Transdutor	mA

Figura 36 – Esquema de ligação dos sensores
Sistema de aquisição de dados