Capitulo 3 – O Aparato Experimental

O presente capítulo tem como objetivo, descrever a RTC construída no Laboratório de Engenharia Química do Centro Universitário da FEI, contemplando a instrumentação, as unidades geradoras de água quente e também, o sistema de aquisição de dados.

3.1. A rede de trocadores de calor – RTC

A estrutura dessa rede de trocadores de calor construída é mostrada na Figura 3.1. O projeto da rede foi desenvolvido utilizando três correntes de processo: duas correntes quentes de circulação fechada e uma corrente fria sem recirculação, com dois trocadores de calor interligados. Além disso, a Figura 3.1 apresenta toda a instrumentação instalada (transmissores de temperatura e vazão) e também os demais equipamentos necessários para a sua operação.

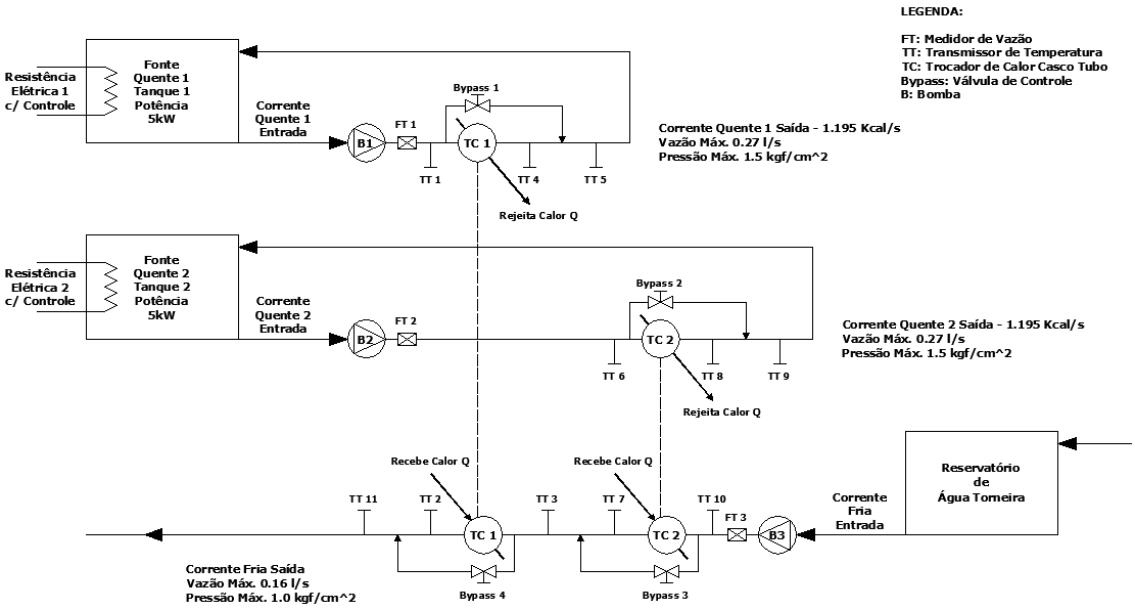

Figura 3.1 – A RTC montada no Laboratório de Engenharia Química.

Toda a tubulação do sistema possui um diâmetro de ½ polegada, confeccionada em aço inox ANSI 304. Esse mesmo material é empregado nas conexões, rotores das bombas e nas unidades de geração de água quente. Somente as tubulações dos *bypasses* apresentam um diâmetro menor, de ¼ de

polegada. Os trocadores de calor construídos apresentam uma área de troca térmica de 0,1m^2, com 6 tubos internos de ¼ de polegada cada um.

A Figura 3.2 mostra uma visão geral da RTC já finalizada, com toda a instrumentação e o sistema de aquisição de dados em operação. A Figura 3.3 mostra o painel elétrico desenvolvido para realizar a aquisição dos sinais dos sensores e também, o acionamento da parte de potência da RTC (bombas e resistências de aquecimento).

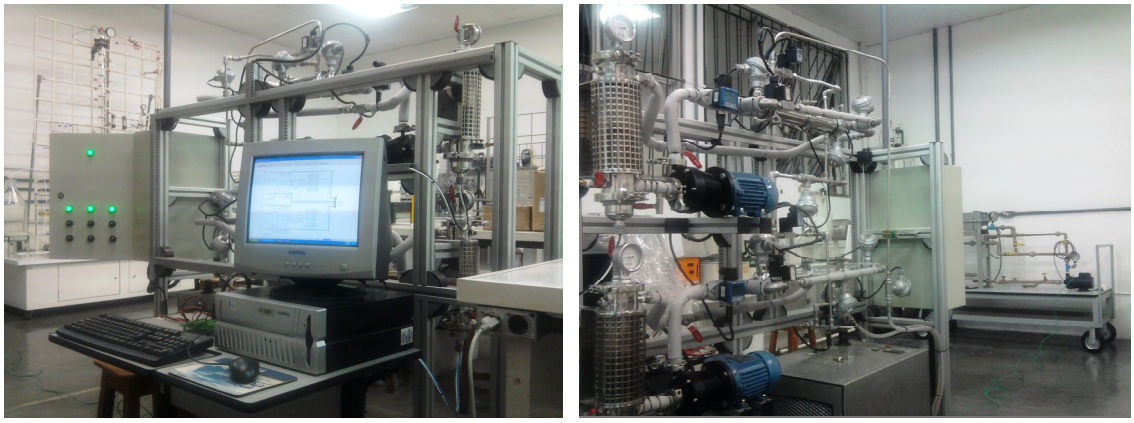

Figura 3.2 – Visão geral da rede de trocadores de calor.

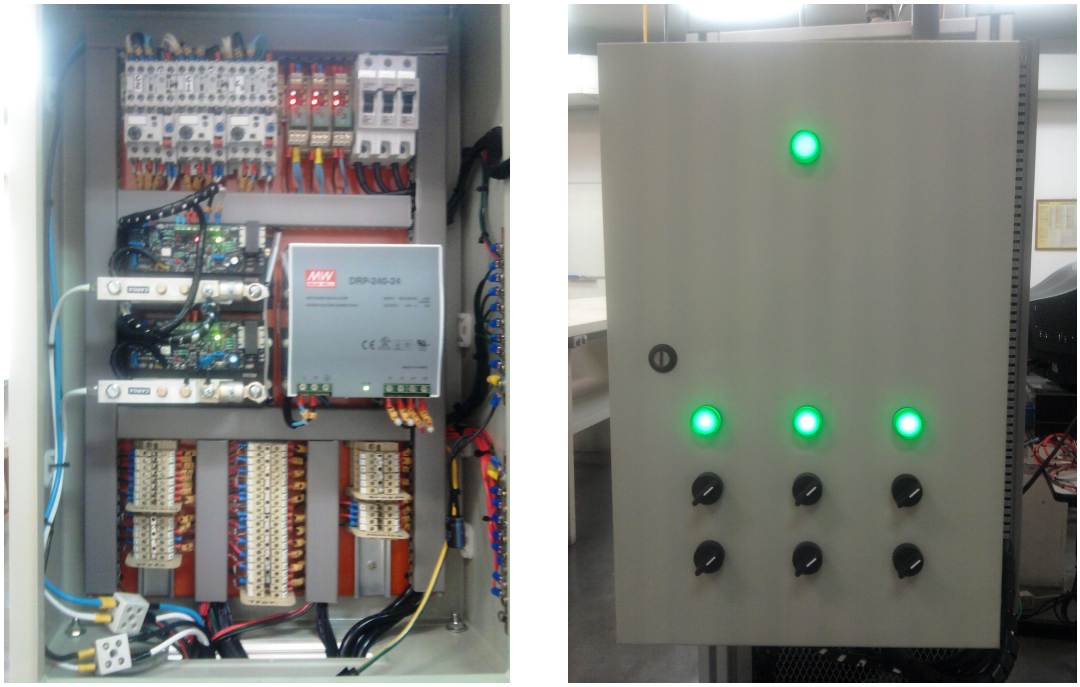

Figura 3.3 – Painel elétrico de comando e interface.

A Tabela 3.1 a seguir tem como objetivo apresentar a relação entre a instrumentação da RTC apresentada na Figura 3.2 com o nome das variáveis utilizadas no sistema de aquisição. Essas variáveis serão utilizadas nos gráficos das simulações e das aquisições a serem apresentados nos Capítulos 4, 5 e 6.

Tabela 3.1 – Relação entre a instrumentação da RTC e variáveis de processo

Variáveis de processo x Instrumentação da RTC	
TT_1	$TH_{IN\ 1}$ – Temperatura entrada quente, TC1
TT_5	$TH_{OUT\ 1}$ – Temperatura saída quente, TC1
TT_6	$TH_{IN\ 2}$ – Temperatura entrada quente, TC2
TT_9	$TH_{OUT\ 2}$ – Temperatura saída quente, TC2
TT_{10}	$TC_{IN\ 2}$ – Temperatura de entrada fria, TC2
TT_3	$TC_{OUT\ 2}$ – Temperatura de saída fria, TC2
TT_3	$TC_{IN\ 1}$ – Temperatura de entrada fria, TC1
TT_{11}	$TC_{OUT\ 1}$ – Temperatura de saída fria, TC1
Bypass 1	fhi_1 – *Bypass* TC1, linha quente
Bypass 2	fhi_2 – *Bypass* TC2, linha quente
Bypass 3	fci_2 – *Bypass* TC2, linha fria
Bypass 4	fci_1 – *Bypass* TC1, linha fria

3.2. Instrumentação do processo

3.2.1. Transmissores de temperatura (TT)

Para a medição das temperaturas do processo foram escolhidos os transmissores de temperatura do tipo PT100 Classe A da empresa *Pirométrica Sensores LTDA*. A Figura 3.4 apresenta o conjunto sensor + cabeçote com o transmissor, formando assim o conjunto designado como *TT*. Já a Tabela 3.2 mostra as informações e características do sensor PT100 + transmissor escolhidos.

Figura 3.4 – Detalhe do transmissor de temperatura (fonte: www.pirometrica.com.br).

Tabela 3.2 – Características dos sensores de temperatura (*TT*)

Transmissores de temperatura – Características	
Tipo sensor	Termoresistência PT100 Classe A, 3 FIOS
Material do corpo do sensor	Aço INOX 304
Dimensões do corpo do sensor	3mm de diâmetro externo, com comprimento de 16mm
Conexão	½ polegada, rosca BSP
Cabeçote transmissor	IP 65 com tampa rosqueada
Características do transmissor	Sinal de saída: 4 a 20 mA, com a escala entre +10ºC até +120ºC, alimentação de 24 V_{CC}
Erro de medição / Precisão	± 0,25ºC

3.2.2. Medidores de vazão (FT)

Os medidores de vazão escolhidos para o projeto são da empresa *Bürkert* alemã, especialista em construção de sensores para medição de grandezas de processo através de tubulações de diâmetro reduzido. Os medidores de vazão escolhidos são do tipo roda d'água (*paddle wheel*), com o corpo em aço inox 304.

Um controlador eletrônico (modelo SE32) foi acoplado ao corpo do transmissor (modelo S030) para realizar a aquisição dos pulsos da roda d'água, condicionando e convertendo adequadamente para a transmissão através de um sinal de 4 a 20mA proporcional à vazão. A Figura 3.5 mostra o transmissor em conjunto com o controlador eletrônico e a Tabela 3.3, as características do transmissor.

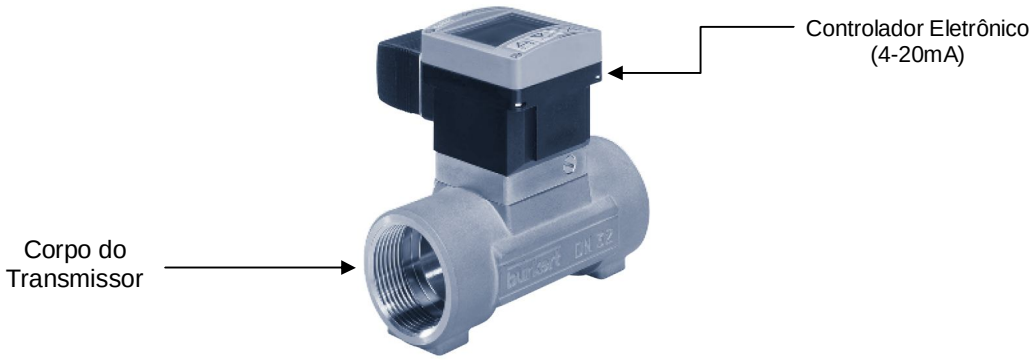

Figura 3.5 – Detalhe do transmissor de vazão (fonte: www.burkert.com).

Tabela 3.3 – Características dos transmissores de vazão (*FT*)

Transmissores de vazão – Características	
Tipo sensor	Roda d'água S030, DN15 – cód. S030-424010
Material do corpo do sensor	Aço INOX 316
Conexão	½ polegada, rosca NPT
Faixa de Medição	0,5 a 1200 $l.min^{-1}$
Erro de medição / Precisão	0,5% FE (10 m/s), K 0,5% FE
Controlador Eletrônico	SE32 – cód. SE32-444699
Características do Controlador	Sinal de saída de 4 a 20 mA, proporcional à faixa de medição, alimentação de 12 a 32 V_{CC}

3.2.3. Válvula de *bypass*

As válvulas de *bypass*, também da empresa alemã *Bürkert,* são do tipo solenóide (modelo 2833). Através do acoplamento de um controlador eletrônico (modelo 8605), com características de funcionamento do tipo PWM (*pulse width modulation*), é possível realizar a abertura da válvula de forma proporcional. Um sinal de comando na faixa de 0 a 10V permite que a válvula possa ser totalmente aberta (10V) ou totalmente fechada (0V). A Figura 3.6 mostra a válvula proporcional de *bypass* em conjunto com o controlador eletrônico e a Tabela 3.4, as características da válvula e do controlador eletrônico.

Figura 3.6 – Detalhe da válvula do *bypass* (fonte: www.burkert.com).

Tabela 3.4 – Características da válvula de *bypass*

Válvula de *bypass* – Características	
Tipo	Solenóide Proporcional modelo 2833 – cód. 175943
Material do corpo do sensor	Aço INOX 316
Conexão	¼ polegada, rosca NPT
Tensão / Potência da Bobina	$24V_{CC}$ / 9W
Controlador Eletrônico	8605 – cód. 178358
Características do Controlador	Sinal de entrada 0 a $10V_{CC}$, alimentação de 12 a $32V_{CC}$, com display

A Figura 3.7 ilustra a instrumentação realizada no trocador de calor, detalhando os transmissores de temperatura e as válvulas de *bypass.*

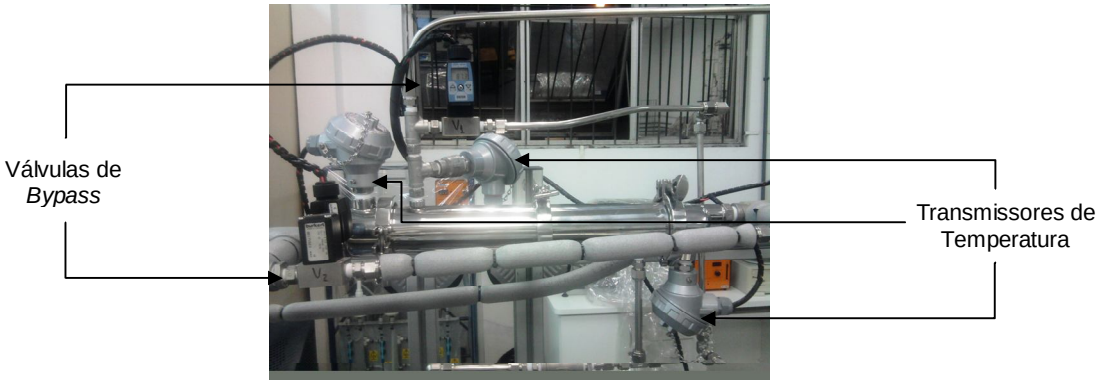

Figura 3.7 – Instrumentação do trocador de calor com as válvulas de *bypass.*

3.3. Unidade de geração de água quente

Para a geração das correntes quentes, são utilizadas duas resistências de 5kW cada uma delas, acoplada a um conversor de potência, fornecido pela empresa Loti. Esse conversor permite que a resistência de aquecimento possa fornecer desde 0% até 100% do seu valor máximo, a partir de um sinal de controle de 0 a 10V, conforme demonstrado pela Figura 3.8. A Tabela 3.5 apresenta as características do conversor de potência utilizado, a Figura 3.9 o conversor propriamente dito e a Figura 3.10 o sistema de aquecimento na RTC.

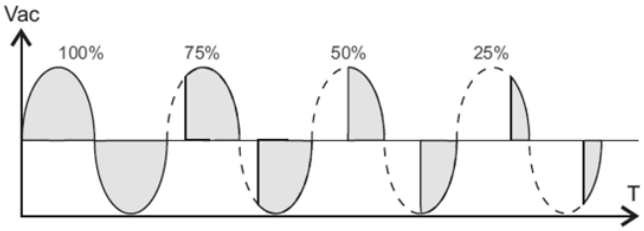

Figura 3.8 – Princípio de funcionamento do conversor de potência (fonte: www.loti.com.br).

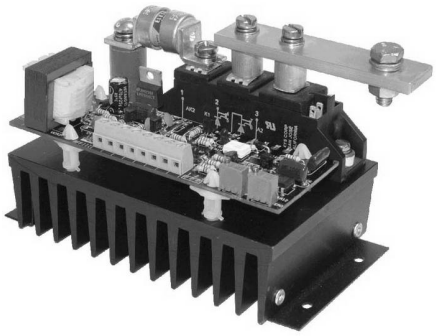

Figura 3.9 – Detalhe do conversor de potência (fonte: www.loti.com.br).

Tabela 3.5 – Características do conversor de potência

Controlador de potência – Características	
Tipo	Conversor de Potência Monofásico Série AFF
Modelo	M1-22062AFF-30A
Tensão Alimentação / Carga	220V / 220V
Corrente Máxima de Saída	30A

Figura 3.10 – Unidade de geração de utilidade quente.

3.4 – Dimensionamento do cabeamento elétrico

Para a interligação dos atuadores elétricos e dos sensores com o painel de comando foram utilizados fios de cobre flexíveis, com isolação de 750V. Para os atuadores elétricos, o diâmetro da fiação foi escolhido em função do seu valor máximo de corrente e da tensão de alimentação. Não foi considerada nos cálculos a compensação da bitola do fio em função do seu comprimento, pois as distâncias envolvidas na interligação foram pequenas.

A Tabela 3.6 e a Tabela 3.7 mostram as bitolas dos cabos utilizadas para o sistema de potência e para os transmissores. O disjuntor principal utilizado para a proteção do painel elétrico foi de 63A, com um consumo total dos equipamentos da ordem de 11kW, já considerando os valores dos fatores de potência dos motores das bombas.

Tabela 3.6 – Dimensionamento dos cabos utilizados – Sistema de potência

Sistema de potência – Alimentação 220V	
Motor Trifásico 1/2cv – Bomba B1	Cabo PP Tripolar 2,5mm^2
Motor Trifásico 1/2cv – Bomba B2	Cabo PP Tripolar 2,5mm^2
Motor Trifásico 1/2cv – Bomba B3	Cabo PP Tripolar 2,5mm^2
Conversor de Potência – Resistência R1	Cabo Flexível 10mm^2
Conversor de Potência – Resistência R2	Cabo Flexível 10mm^2

Tabela 3.7 – Dimensionamento dos cabos utilizados – Transmissores

Transmissores – Alimentação 24V$_{CC}$ + Sinal	
Transmissor de Temperatura – TT	Cabo Flexível 1,0mm^2
Transmissor de Vazão – FT	Cabo Flexível 1,0mm^2
Válvula de *Bypass*	Cabo Flexível 1,0mm^2
Sinal Controle – Conversor de Potência Bifásico	Cabo Flexível 1,0mm^2

3.5 – Esquemas elétricos

Todos os esquemas elétricos desenvolvidos para a montagem do painel elétrico, interligação e acionamento dos motores das bombas, das resistências de aquecimento, das válvulas de *bypasses* e dos transmissores de temperatura e vazão, encontram-se a no Anexo VI do presente trabalho.

3.6 – Sistema de aquisição de dados e o modo de operação da RTC

A operação da rede de trocadores será realizada através do sistema de aquisição de dados e de controle instalado em um computador PC junto a rede. Existe uma possibilidade de realizar a ligação das bombas B1, B2 e B3 de forma manual ou automática através de uma chave seletora no painel elétrico do equipamento. No modo manual, as bombas são ligadas através das chaves existentes no painel elétrico; no modo automático, as bombas são ligadas pelo computador, através de um sinal elétrico digital (0 a 5V) proveniente da placa de aquisição. Um circuito eletrônico foi desenvolvido para que as bobinas dos relês de interface pudessem ser acionados. A Figura 3.11 mostra o circuito desenvolvido para realizar esse condicionamento de sinal, acionando os relês de forma remota a partir da placa de aquisição.

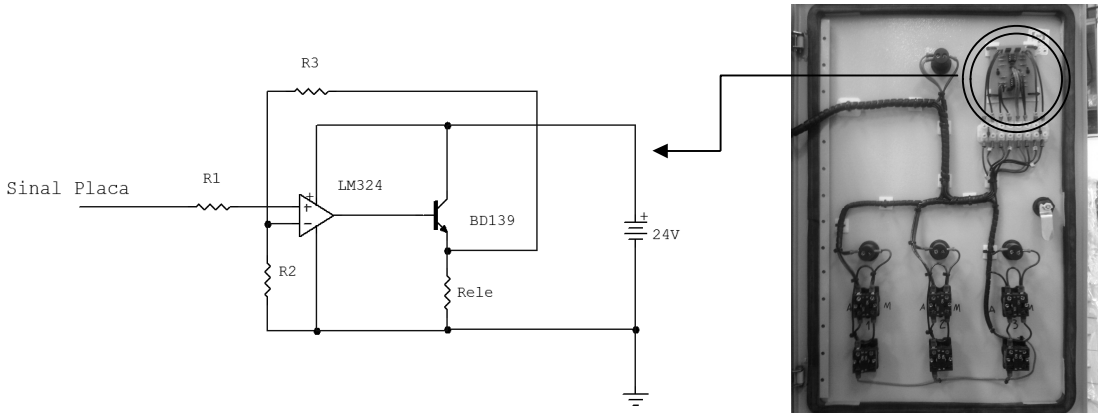

Figura 3.11 – Circuito conformador de sinal para acionamento remoto das bombas.

Para a aquisição dos sinais e controle da rede de trocadores foram utilizadas duas placas da National Instruments: a PCI 6221 e a PCI 6251 (Vide Tabelas 3.8 e 3.9 e Figura 3.12). As placas de aquisição foram configuradas e ajustadas no *Matlab*, através do *toolbox* do Simulink chamado de *REAL TIME WINDOWS TARGET*. Esse *toolbox* permite a simulação de modelos em tempo real, desenvolvidos no ambiente *Simulink*, a partir de computadores PC com uma placa de aquisição de dados. Basicamente, o *toolbox* compila o modelo Simulink para um programa em linguagem C, fazendo com que esse programa seja executado diretamente no processador da máquina, garantindo o controle em tempo real do sistema, além de ser capaz de adquirir e salvar os dados de execução do processo.

Tabela 3.8 – Características da placa NI-PCI6221 (37pin)

NI-PCI 6221 (37pin)	
Número de Entradas Analógicas	16 canais *single ended* 8 canais diferenciais
Número de Saídas Analógicas	2 canais
Número de Entradas / Saídas Digitais	24 configuráveis
Resolução do Conversor A/D	16 bits
Tensão Máxima das Entradas Analógicas	± 10 Volts
Frequência de Amostragem	250 kS/s

Tabela 3.9 – Características da placa NI-PCI6251

NI-PCI 6251	
Número de Entradas Analógicas	16 canais *single ended* / 8 canais diferenciais
Número de Saídas Analógicas	2 canais
Número de Entradas / Saídas Digitais	24 configuráveis
Resolução do Conversor A/D	16 bits
Tensão Máxima das Entradas Analógicas	± 10 Volts
Frequência de Amostragem	1,00 MS/s

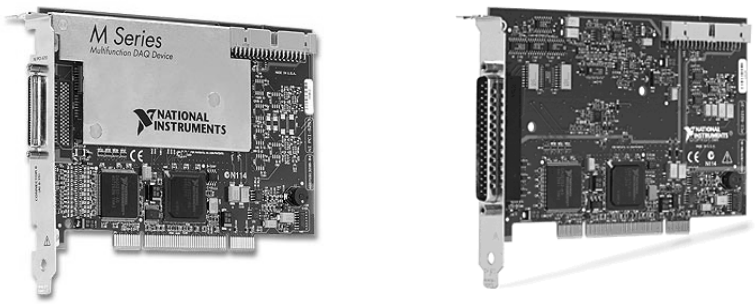

Figura 3.12 – Placas NI-PCI 6251 (esquerda) e NI-PCI 6221 – 37pin (direita).