Marcelo Fernando Selli

**IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES DE ESCOAMENTO
HORIZONTAL BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO ATRAVÉS DE
DISTRIBUIÇÃO TEMPO-FREQÜÊNCIA E REDES NEURAIS**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Assoc. Paulo Seleglim Jr.

São Carlos

2007

DEDICATÓRIA

A minha filhinha Marcela, que tantas vezes interrompeu-me a escrita desta tese, e trazia ainda mais de seus motivos e alegrias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Assoc. Paulo Seleghim Jr., meu orientador e amigo, por esta oportunidade, pela paciência que teve comigo e pela sabedoria e destacada competência com as quais orientou meus trabalhos e redirecionou meus esforços nos momentos em que eu perdera o caminho.

À Universidade de São Paulo por colocar a sua estrutura à minha disposição.

Sou grato também aos meus professores, pela formação, e aos funcionários do NETeF – USP, pelos esforços na construção e manutenção das tubulações, bombas, válvulas, instrumentação e programas computacionais para controle da seção de testes e aquisição de dados. Sem eles, e seus resultados, a conclusão deste trabalho não teria sido possível.

RESUMO

SELLI, M. F. (2007). Identificação de padrões de escoamento horizontal bifásico gás-líquido através de distribuição tempo-frequência e redes neurais. *Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica*, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

O presente trabalho tem como objetivo fundamental a construção de um sistema de identificação capaz de diagnosticar em tempo real as diferentes configurações de escoamentos bifásicos horizontais. É importante ressaltar que o desenvolvimento deste “know-how” é capital para a operação eficaz de instalações de manipulação e ou transporte de fluidos multifásicos, e representa, hoje, um dos grandes desafios nas indústrias do petróleo e termonuclear.

O princípio de funcionamento do sistema proposto baseia-se nos sinais captados por um sensor de pressão flutuante de resposta rápida, e no seu pós-processamento com auxílio da transformada de Gabor e de uma rede neural convenientemente treinada. A implementação é tal que a operação de diagnóstico pode ser feita “on-line”, desde a aquisição dos sinais até o pós-processamento. Resultados experimentais foram obtidos no circuito experimental do NETeF - Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos da USP – Universidade de São Paulo, para uma secção de testes horizontal com 12 m de comprimento e diâmetro interno de 30 mm. Em específico foram ensaiados os seguintes padrões de escoamento ar-água: estratificado liso, ondulado, intermitente, anular e a bolhas. Os resultados mostram que, dependendo dos limites de detecção pré-estabelecidos, todos os principais padrões de escoamento bifásico horizontal são identificados corretamente.

Palavras-chave: Escoamento multifásico. Padrões de escoamento.

Transformada de Gabor. Redes neurais.

ABSTRACT

SELLI, M. F. (2007). Identification of horizontal gas-liquid two-phase flow patterns through time-frequency distribution and neural networks. *Ph.D. Thesis in Mechanical Engineering*, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

The fundamental objective of this work is the construction of an identification system capable of diagnosing in real time different configurations of horizontal two-phase flow patterns. It is important to emphasize that the development of this know-how is capital to the efficient operation of facilities for manipulation and transportation of multiphase fluids, and represents, today, one of the most important challenges in the oil and thermonuclear industries.

The working principle of the proposed system is based on the signals acquired by a rapid response fluctuating pressure sensor, and on its post processing through Gabor Transform and on a conveniently trained artificial neural network. The implementation is accomplished in way that the diagnosis operation is performed on-line, from signal acquisition to post-processing. Experimental results were obtained on the experimental circuit at NETeF – Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos of USP – Universidade de São Paulo, at São Carlos, using a horizontal test section, with 12 m length and 30 mm internal diameter. Experiments were done with the following air-water flow patterns: stratified smooth, wavy, intermittent, annular, and bubbly. Results show that, depending on the preset detection limits, all the main horizontal two phase flow patterns were correctly identified.

Keywords: Multiphase flow. Flow patterns. Gabor transform. Neural networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Padrões típicos de escoamento gás-líquido.	19
Figura 2: Seção do duto de transporte bifásico gás-líquido em escoamento estratificado liso.	20
Figura 3: Diagrama de blocos de solução da transição entre padrões estratificado e intermitente ou anular	31
Figura 4: Diagrama de blocos de solução da transição entre padrões intermitente e anular	31
Figura 5: Diagrama de blocos de solução da transição entre os padrões estratificado liso e estratificado ondulado	32
Figura 6: Diagrama de blocos de solução da transição entre padrões intermitente e a bolhas.	32
Figura 7: Mapa de padrões de escoamento bifásico de Taitel & Dukler para tubulação horizontal e diâmetro interno de 30 mm – NETeF	33
Figura 8: Mapa de padrões de escoamento bifásico de Taitel & Dukler para tubulação horizontal e diâmetro interno de 22 mm – NETeF	34
Figura 9: Mapa de padrões de escoamento bifásico de Taitel & Dukler para tubulação horizontal e diâmetro interno de 21 mm – NETeF	34
Figura 10: Representação esquemática de uma rede neural tipo “feed-forward” mapeando um vetor de entrada de 5 coordenadas de para um vetor de saída de 3 coordenadas.	39
Figura 11: Seção de testes no NETeF – USP	44
Figura 12: Diagrama esquemático da seção de testes do NETeF – USP.....	45
Figura 13: Instrumentação de operação da planta	46
Figura 14: Montagem do transmissor de pressão na seção de testes.....	48
Figura 15: Diagrama de blocos da solução.....	51
Figura 16: Diagrama esquemático da solução	51
Figura 17: Janela LabView para a operação da planta e aquisição e condicionamento de sinais.	52
Figura 18: Arquitetura geral do sistema.....	54
Figura 19: Diagrama de Fluxo de Dados do Sistema.....	55
Figura 20: Diagrama Hierárquico de Funções do Sistema.....	55

Figura 21: Janela de parâmetros do módulo de execução e controle da transformada de Gabor. Pode-se nela arbitrar todos os parâmetros de aquisição e processamento da transformada. As áreas gráficas permitem a visualização interativa da modulação entre a janela analisadora gaussiana e a frequência de teste arbitrada.....	58
Figura 22: Janela de apresentação gráfica da pressão dP/dx (0 a 200 mm H_2O) e seus respectivos coeficientes tempo-frequência, para uma janela de tempo de 30 segundos, $T = 0.5$ s, range de 0 a 18 Hz e $\Omega = 0.5$ Hz.	60
Figura 23: Arquitetura de alimentação da rede neural artificial	61
Figura 24: Janela de ajuste dos parâmetros da rede neural.....	62
Figura 25: Ambiente operacional do SNNS, com as janelas de controle, treinamento, gráfico de convergência, arquitetura e níveis de disparo de cada neurônio.....	63
Figura 26: Janela de identificação do padrão de escoamento. De cima para baixo: pressão dP/dx , coeficientes tempo-frequência e as saídas da rede neural (em verde, e em zero quando inativas e em vermelho, e em 1, quando ativadas).....	65
Figura 27 : Mapa de Taitel & Dukler calculado para a seção de testes do NETeF. A região tracejada delimita o espaço de amostragem e operação efetiva da planta, com seus limites definidos pela potência do compressor e pela região de operação estável das bombas.....	67
Figura 28 : Gráfico SNNS de convergência de erro no treinamento da rede neural. O eixo x mostra o número de épocas do algoritmo de treinamento e o y mostra o erro relativo.....	68
Figura 29: Sinais de pressão, seus respectivos coeficientes tempo-frequência e as saídas da rede neural durante transição entre os padrões anular e a bolhas. A janela total de tempo apresentada é de 30 segundos.	69
Figura 30: Sinais de pressão, seus respectivos coeficientes tempo-frequência e as saídas da rede neural durante transição entre os padrões a bolhas e intermitente. A janela total de tempo apresentada é de 30 segundos.	70

Figura 31: Sinais de pressão, seus respectivos coeficientes tempo-frequência e as saídas da rede neural em diagnóstico de padrão anular. A janela total de tempo apresentada é de 30 segundos.	71
Figura 32: Visualização gráfica da função de erro simplificada para $\Re^3$	74
Figura 33: Visualização gráfica da distribuição das saídas da rede neural combinadas para os diagnósticos de padrão estratificado, estratificado ondulado e intermitente.....	78
Figura 34: Visualização gráfica da distribuição das saídas da rede neural combinadas para os diagnósticos de padrão a bolhas, anular e intermitente.....	79
Figura 35: Função sigmóide de ativação neural. Utilizada uniformemente em todos os neurônios da rede.	81

LISTA DE SÍMBOLOS

Em decorrência da superposição de alguns símbolos utilizados em diferentes seções, a lista de símbolos deste trabalho é aqui dividida em três diferentes sub listas:

Lista de Símbolos utilizados na modelagem de escoamentos bifásicos na seção 2.1:

D	Diâmetro
D_L	Diâmetro hidráulico equivalente para fase líquida
D_G	Diâmetro hidráulico equivalente para fase gasosa
h	Altura de coluna da fase líquida no duto
A_L	Área de seção transversal ocupada pela fase líquida
A_G	Área de seção transversal ocupada pela fase gasosa
S_L	Superfície de contato entre fase líquida e parede do duto
S_G	Superfície de contato entre fase gasosa e parede do duto
S_i	Superfície de interface entre as fases líquida e gasosa
U_{GS}	Velocidade superficial da fase gasosa
U_{LS}	Velocidade superficial da fase líquida
β	Ângulo de inclinação do duto
τ_L	Tensão de cisalhamento da fase líquida na parede do duto
τ_G	Tensão de cisalhamento da fase gasosa na parede do duto
τ_i	Tensão de cisalhamento na interface entre as fases líquida e gasosa
ρ_L	Massa específica da fase líquida
ρ_G	Massa específica da fase gasosa
g	Aceleração da gravidade
f_L	Fator de atrito da fase líquida
f_G	Fator de atrito da fase gasosa
$\tilde{h}$	h adimensional
$\tilde{A}_L$	Área da fase líquida adimensional
$\tilde{A}_G$	Área da fase gasosa adimensional

$\tilde{S}_L$	Superfície adimensional de contato entre fase líquida e parede do duto
$\tilde{S}_G$	Superfície adimensional de contato entre fase gasosa e parede do duto
$\tilde{S}_i$	Superfície adimensional de contato entre fases líquida e gasosa
$\tilde{U}_L$	Razão entre áreas adimensionais do duto da fase líquida
$\tilde{U}_G$	Razão entre áreas adimensionais do duto da fase gasosa
n_L	Viscosidade cinemática da fase líquida
n_G	Viscosidade cinemática da fase gasosa
F_B	Forças de empuxo atuante na fase gasosa
F_T	Forças de flutuação turbulenta atuantes na fase líquida
a	Fração de vazio

Lista de Símbolos utilizados na modelagem dos diagramas tempo-freqüência na seção 2.2:

τ	Vizinhança do tempo de análise t.
T	Resolução temporal dos coeficientes de tempo freqüência
Ω	Resolução em freqüência dos coeficientes de tempo freqüência
w	Freqüência em rad/s
$s_t(\tau)$	Sinal genérico s() no tempo τ
$h_t(\tau)$	Função analisadora
$P(t, w)$	Distribuição de densidade de potência
$\alpha(\tau)$	Função de decaimento da janela gaussiana
a_{mk}	Coeficientes de decomposição ou átomos de Gabor

Lista de Símbolos utilizados na modelagem de redes neurais artificiais na seção 2.3:

$F_{i,j}(\bullet)$	Função de ativação do neurônio i na camada j da rede
s_{ij}	Saída do neurônio i na camada j da rede
$b_{i,j}$	“Bias” neurônio i na camada j da rede
$w_{i,j}$	Peso neurônio i na camada j da rede
x_i	Valores de entrada da rede
h_j	Valores de saída da rede
x_i^p	Conjunto de valores de entrada com dimensão p
d_i^p	Conjunto de valores de saída com dimensão p
e	Função de erro da rede

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 ESCOAMENTOS GÁS-LÍQUIDO.....	19
2.1.1.1 Escoamento estratificado em regime permanente	21
2.1.1.2 Transição entre escoamentos estratificado e intermitente	25
2.1.1.3 Transição entre escoamentos intermitente e anular	26
2.1.1.4 Transição entre escoamentos estratificado liso e estratificado ondulado	26
2.1.1.5 Transição entre escoamentos intermitente e a bolhas	28
2.1.2 Cálculo do mapa de Taitel & Dukler para o circuito de testes do NETeF	30
2.2 DIAGRAMAS TEMPO FREQUÊNCIA E A TRANSFORMADA DE GABOR	35
2.3 REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS	39
3 CIRCUITO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO.....	43
3.1 Instrumentação de Operação da Planta da Seção de Testes.....	43
3.2 Instrumentação Experimental.....	48
4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	50
4.1 Desenvolvimento de ferramentas	51
4.1.1 Desenvolvimento do módulo de cálculo dos coeficientes tempo-frequência – Transformada de Gabor	56
4.1.2 Desenvolvimento do módulo de simulação de redes neurais.....	61
4.1.3 A solução integrada	64
5 TESTES EXPERIMENTAIS	66
6 RESULTADOS	72
7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	82
REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE A – Programas C para cálculos das transições Taitel & Dukler.....	91

APÊNDICE B – Transições entre padrões de escoamento por Taitel & Dukler	
.....	99

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Escoamentos multifásicos são comuns em tubulações na indústria de processamento e transporte de fluidos. Na indústria do petróleo, como exemplo, a monitoração de escoamentos óleo-gás se faz cada vez mais necessária para operação segura nos campos de exploração e produção. Sistemas de controle de separadores trifásicos água-óleo-gás embarcados em plataformas de produção “off-shore” são freqüentemente submetidos a importantes transientes de operação. Estes transientes podem diminuir de forma drástica a eficiência e a vida útil destes equipamentos. Um exemplo típico de transiente nestes separadores é a chegada não monitorada de uma golfada de óleo, que causa grandes distúrbios nas estratégias de controle de nível de interface entre fases, percentual de injeção de desemulsificantes, entre outros fatores. Oscilações desta natureza contribuem para a diminuição da eficiência do equipamento, o que produz o aumento do BSW (“based sediment & water” – ou percentual de água no óleo) do óleo e o TOG (teor de óleo e graxa) da água nas saídas do separador. A aplicação de mecanismos de inferência capazes de diagnosticar mudanças nos padrões de escoamento podem ampliar o espectro de informações disponíveis aos operadores destas indústrias, tornando a operação mais eficiente e segura. Outra abordagem também interessante é a que se relaciona à monitoração de escoamentos em dutos de transporte de óleo e gás.

Aplicações industriais de monitoração de escoamentos multifásicos em dutos – podemos citar com segurança as aplicações de detecção de vazamentos na indústria do petróleo – ainda hoje podem ser consideradas incipientes. A indisponibilidade de ferramentas que disponibilizem informações acerca da configuração do escoamento no interior do duto impossibilita a aplicação de uma mesma solução tecnológica em diferentes condições de operação. Como exemplo, temos a aplicação de sistemas de detecção de vazamentos baseados em modelos matemáticos para escoamento bifásico a óleo e gás. Estas aplicações, desenvolvidas à partir de modelos matemáticos estabelecidos para uma determinada configuração de escoamento multifásico não produzem

resultados satisfatórios em outras. Isso implica em que as condições de operação de um determinado duto devem ser conhecidas previamente, na fase de análise do projeto. A disponibilidade de ferramentas de tempo real para o diagnóstico do padrão de escoamento multifásico em dutos contribuiria para o aumento da aplicabilidade destas tecnologias através da generalização das suas soluções. A consequência direta disto seria a diminuição de custos operacionais e o aumento na confiabilidade e disponibilidade destas aplicações.

De forma geral, sistemas baseados em modelagem matemática têm sido aplicados em escoamentos monofásicos e bifásicos estratificados. Em escoamentos monofásicos de hidrocarbonetos na fase líquida, estimativas de volume vazado podem ser calculadas a partir da aplicação de modelos físico-matemáticos para balanço de volumes compensados, de acordo com o que é estabelecido pela norma API-1130 (1995). Após o anúncio de um alarme de vazamento, a localização deste ao longo de um duto pode ser estimada à partir do método dos gradientes de pressão. Em outro conjunto de tecnologias estão as aplicações orientadas aos escoamentos bifásicos a óleo e gás. Nesta classe de solução a indústria tem aplicado tecnologias baseadas em análise de formas de onda de pressão (SILVA et al.,1996). Podemos também citar os sistemas disponíveis comercialmente e conhecidos como acústicos – termo este que se baseia no fato de todo o processamento ser feito à partir das ondas de pressão dinâmica, adquiridas a montante e a jusante do trecho monitorado, e de modelos baseados na velocidade de propagação destas ondas no meio multifásico. Vale observar que esta velocidade depende fortemente da fração de fase e das configurações de velocidades e interfaces entre as fases do escoamento. Modelagens elaboradas são descritas por Lamb (1932) acerca do comportamento hidrodinâmico destes escoamentos.

O funcionamento desta tecnologia passa pela aplicação de filtros e processamentos matemáticos aos sinais de pressão – adquiridos por sensores de resposta rápida instalados à montante e à jusante do trecho monitorado. O objetivo é inferir se uma forma de onda peculiar à um vazamento é encontrada nos dois sinais. Se sim, a localização do vazamento é então calculada com

base nos tempos de propagação destas ondas a montante e a jusante do vazamento. Atualmente, esta tecnologia não permite que se estime quantitativamente o volume vazado (pode-se estimar de forma qualitativa, pela energia do sinal captado, sua distância ao sensor, fatores de atenuação, etc.) e é muito sensível às mudanças na velocidade de propagação destes transientes hidrodinâmicos. Esta velocidade é, por sua vez, função também do padrão do escoamento multifásico estabelecido e das características físicas dos fluidos em transporte. Outro fato a destacar é que a estimativa da localização do suposto vazamento tem sua maior componente de incerteza na variação da velocidade de propagação destas ondas.

Aplicações baseadas em outras tecnologias estão também disponíveis para uso industrial em monitoração e transporte de fluidos monofásicos, em fase líquida ou gasosa. Zhang (1993, 1997, 1999), Tindel (2004) e Moura et al. (2004) descrevem aplicações industriais de sistemas de monitoração de escoamento baseados em computação de balanço de volume compensado combinado com técnicas estatísticas de tratamento de sinais. Silva et al. (2003) apresenta um modelo de detecção de vazamentos para um duto de GLP à partir de balanço de volume compensado com mecanismo de decisão de alarme efetuado por algoritmo baseado em lógica “fuzzy”. Especificações e métodos de aferição de performance esperada para estes sistemas de detecção de vazamentos em dutos para transporte de hidrocarbonetos podem ser encontradas nas normas API 1130 (1995) e API 1155 (1995).

Cada uma das diferentes abordagens possuem suas próprias peculiaridades, que se figuram como vantagens ou desvantagens em referência às demais. Pode-se conceber, no objetivo de se fazer uso das características favoráveis de cada uma das tecnologias em um sistema para aplicação industrial, um sistema híbrido que use modelos matemáticos e/ou técnicas de processamento de sinais adequados ao padrão de escoamento detectado na tubulação. O diagnóstico dos padrões de escoamento multifásico – o monofásico de gás ou líquido é um subconjunto deste - portanto faz-se de capital importância na habilitação do desenvolvimento e aplicação da próxima geração destes sistemas híbridos para monitoração de escoamentos.

Foi determinado então o objetivo principal deste trabalho, que é a implementação de um método capaz de inferir em tempo real o padrão de escoamento bifásico gás-líquido no interior de uma tubulação. A inferência é feita com auxílio de diagramas tempo-frequência, calculados à partir da transformada de Gabor, aplicada a sinais de pressão diferencial flutuante adquiridos em tomadas na tubulação, e de modelos de redes neurais artificiais. O texto é organizado progressivamente em tópicos; são descritos conceitos básicos da análise dos coeficientes tempo-frequência e da Transformada de Gabor; conceitos básicos de redes neurais artificiais; instalações experimentais e instrumentação utilizada; alguns detalhes acerca dos experimentos, análise de resultados e conclusões e perspectivas para trabalhos futuros. A nomenclatura e simbologia utilizadas são específicas para cada capítulo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Novas tecnologias de escoamento interno confinado vêm sendo desenvolvidas, como a de transporte de óleos pesados através do escoamento bifásico óleo-água em padrão anular ou “core flow” (BANNWART, 2001, BANNWART et al., 2004), que traz resultados expressivos em ganhos de produtividade, decorrente da drástica redução da perda de carga ao longo da tubulação. Contudo, a aplicação segura destas tecnologias na indústria, de modo geral, demanda a disponibilidade de sistemas de monitoração e controle dos diferentes padrões de escoamento multifásico.

O desenvolvimento de critérios objetivos de identificação de padrões de escoamento tem sido objetivo central de muitas pesquisas nos últimos anos (SELEGHIM, 1996). O uso de sinais de pressão e suas respectivas análises espectrais foi provavelmente uma das primeiras pesquisas neste assunto, desenvolvida por Hubbard e Dukler (1966), através da qual alguns padrões de escoamento puderam ser inferidos. Na mesma linha de pesquisa, podemos citar outros trabalhos como Weisman et al. (1979), Vince e Lahey (1982), Matsui (1984), Tutu (1984), Mishima e Ishii (1984), Sekoguchi et al. (1987) entre outros.

Uma revisão detalhada dos trabalhos realizados nesta linha de pesquisa até os anos 80 foi feita por Drahos e Cermak (1989). Este trabalho descreve os métodos de diagnósticos de padrões de escoamentos e visualiza que os diagnósticos baseados em processamento dos parâmetros estruturais (“voidage”) e energéticos (pressão) seriam promissores. Com a disponibilidade de hardware e software adequados, começa-se então a publicar alguns trabalhos onde diferentes técnicas de extração de informação e mecanismos de inferências são utilizados para processar estes parâmetros e diagnosticar com menor incerteza estes padrões de escoamento.

Entre estas técnicas, temos as de análise de sinais, como a filtragem adaptativa, “wavelets” e os métodos fractais, que marcaram a tendência nos

anos 90. Métodos interessantes foram propostos para caracterização dos padrões de escoamento à partir de aspectos fractais ou caóticos por Saether et al. (1990), França et al. (1991) e Lewin (1992). Para escoamentos bifásicos, Hervieu e Leducq (1991) demonstraram o potencial da transformada “wavelet” na caracterização de padrões em escoamentos verticais. Depois, Seleglim e Hervieu (1994) apresentaram um indicador de transição de padrão a bolhas para o intermitente baseado na quantificação de perda de estacionariedade pelo desvio padrão da frequência instantânea de Ville. Finalmente, Hervieu e Seleglim (1998) otimizaram o critério proposto, fazendo-o universal, independente de transição e sinais analisados, propondo o uso da covariância tempo-frequência, calculada pela transformada de Gabor.

Em 1998, Angeli e Hewitt publicaram um trabalho mostrando a relação entre a fração de fase – apurada a partir de sonda de impedância de alta frequência - com a velocidade da mistura e o padrão de escoamento.

Paralelamente, outra abordagem interessante e promissora que de certa medida segue as idéias descritas acima é a aplicação de técnicas de reconhecimento de padrões, através de modelo conexionistas ou redes neurais artificiais. Alguns destes modelos, dentre outras propriedades matemáticas interessantes, possuem a chamada memória associativa, o que lhes confere capacidade de generalização. Esta característica em teoria habilita a obtenção de melhores resultados em interpolações e extrapolações de resultados.

Provavelmente, o primeiro trabalho que aplicou redes neurais artificiais para identificar padrões de escoamento foi o de Mi et al. (1998), que usou como entrada da rede os momentos estatísticos calculados à partir de sinais de impedância. Estes sinais foram simulados através de um modelo teórico de escoamento gás-líquido vertical, baseado no mapa de Mishima e Ishi (1984). Neste trabalho, os autores simularam redes neurais tipo “back-propagation” e auto organizáveis.

Crivelaro (1999, 2002) treinou varias redes individuais com saída única, cada uma acionada na presença de um determinado padrão de escoamento, a partir

de sinais de impedância adquiridos de escoamento horizontal água-ar. Neste trabalho foram obtidos índices de detecção correta entre 80% e 60%, respectivamente para os padrões intermitente e anular, com atrasos variando entre 5 e 120 segundos. Estes resultados, associados à necessidade de se instalar uma sonda de impedância elétrica para a aquisição dos sinais, tornaram inadequada a utilização da técnica proposta em aplicações industriais.

Na tendência do uso de técnicas de processamento digital de sinais em conjunto com mecanismos inteligentes de inferência, Wu et al. (2001) descreve um método de diagnóstico à partir de sinais de pressão diferencial adquiridos com sensores piezo resistivos de resposta rápida. Neste trabalho os sinais são filtrados através de séries de “wavelets”, e um vetor de características dos vários padrões de escoamento é calculado através da teoria dos fractais. Estes vetores são então utilizados como entrada no treinamento de uma rede neural artificial para reconhecimento dos padrões estratificado, intermitente e anular.

Em outra arquitetura, Yan (2003) treinou uma rede neural classificadora com várias saídas, uma para cada padrão, utilizando dados simulados baseados em sensor capacitivo de tomografia. Xie et al. (2004) obtém resultados satisfatórios em estudos de transportabilidade de aplicações de diagnóstico de escoamento vertical gás-líquido-fibra utilizando a mesma rede neural para processar sinais provenientes de diferentes sensores de pressão.

O presente trabalho é sobre o desenvolvimento de uma aplicação para uso “on-line” e em tempo real para o diagnóstico dos padrões de escoamento bifásico horizontal gás-líquido. A expressão “on-line” é usada no sentido de que os sensores estão conectados diretamente na tubulação, fazendo medidas de forma contínua para processamento em tempo real. O diagnóstico será dado por redes neurais artificiais, que terão como entrada as distribuições de coeficientes tempo-freqüência, calculados pela aplicação da transformada de Gabor a sinais de gradientes de pressão convenientemente adquiridos da tubulação. Um dos primeiros trabalhos a utilizar redes neurais artificiais

conjuntamente com distribuições tempo-freqüência é relatado por Kandel (1992).

A principal idéia a corroborar o desenvolvimento e aplicação conjunta destas técnicas é o fato de que, se as componentes espectrais – obtidas a partir da distribuição tempo-freqüência de Gabor - são distintas para cada padrão de escoamento, e se é dado que uma rede neural pode classificar e generalizar estes diagramas, pode-se então construir uma ferramenta de inferência capaz de produzir resultados mais precisos e confiáveis que a aplicação isolada de cada uma destas tecnologias. A não aplicação de filtragem no processamento dos sinais é também parte do objetivo, porque pode-se considerar que importantes porções de informação contidas nestes sinais são perdidas durante a extração daquilo que acredita-se serem os ruídos.

2.1 ESCOAMENTOS GÁS-LÍQUIDO

As duas subseções seguintes descrevem os modelos aplicados ao escoamento bifásico de Taitel e Dukler (1976) e os cálculos dos mapas de escoamento específicos a cada uma das seções de testes do NETeF.

2.1.1 Modelagem dos Mapas de Escoamento

Temos nesta seção uma breve explanação sobre escoamento horizontal bifásico confinado. São descritas as equações (TAITEL e DUKLER, 1976) que delimitam as regiões de fronteira entre os diferentes padrões de escoamento bifásico gás-líquido e o resultante mapa de escoamento bifásico de Taitel & Dukler. A resolução das equações é feita através de métodos computacionais e os seus resultados são utilizados como referência para condução dos experimentos e avaliação dos resultados obtidos.

Figura 1: Padrões típicos de escoamento gás-líquido.

A figura 1 acima descreve os padrões de escoamento bifásico referenciados e produzidos nos desenvolvimentos e experimentações deste trabalho. Nos detalhes temos os padrões estratificado liso (fase líquida estratificada e escoamento laminar na interface entre as fases), estratificado ondulado (fase líquida estratificada e escoamento com estrutura ondulada na interface gás-líquido), intermitente (fases líquida e gasosa ocorrendo alternadamente), a bolhas dispersas (fase gasosa em bolhas dispersas na fase líquida) e o anular (a fase gasosa escoia completamente envolvida pela fase líquida, que escoia em contato com a parede do duto).

As ocorrências destas fases foi pioneiramente modelada por Taitel e Dukler em 1976. Deste trabalho resultou o bem conhecido mapa de escoamento que leva o nome dos autores. O mapa é definido graficamente pela velocidade superficial do gás U_{GS} (m/s) no eixo das abscissas e pela velocidade superficial do líquido U_{LS} (m/s) no eixo das ordenadas. A relação entre os pares (U_{GS}, U_{LS}) que definem a fronteira entre os diferentes padrões de escoamento é deduzida das equações diferenciais para conservação de momento, energia ou massa para um duto onde existem as fases líquida e gasosa. A figura 2 descreve a seção do duto e os parâmetros à partir dos quais os cálculos são efetuados.

Figura 2: Seção do duto de transporte bifásico gás-líquido em escoamento estratificado liso.

Nesta figura são determinadas as dimensões D = diâmetro interno, h = altura de coluna da fase líquida, A_G e A_L , que são as áreas ocupadas pelas fases gasosa e líquida, respectivamente, S_G , S_L e S_i , que são os componentes perimetrais definidos pelas fases gasosa, líquida e de interface entre elas,

respectivamente. Os termos U_G e U_L são as velocidades médias locais das fases gasosa e líquida, respectivamente, e β , o ângulo de inclinação da seção.

Uma revisão detalhada dos modelos e equacionamentos utilizados aqui pode ser encontrada no trabalho de Taitel e Dukler (1976). No escopo deste trabalho apenas apresentaremos as equações regentes de cada uma das transições estudadas com alguns comentários acerca de seus desenvolvimentos e utilização.

2.1.1.1 Escoamento estratificado em regime permanente

Como esta configuração de escoamento é de central importância, o nosso passo inicial é o estabelecimento das relações gerais que a governam

O balanço de momento para cada uma das fases nos leva a:

$$-A_L \left(\frac{dP}{dx} \right) - \tau_L S_L + \tau_i S_i + \rho_L A_L g \sin \beta = 0 \quad (1)$$

$$-A_G \left(\frac{dP}{dx} \right) - \tau_G S_G - \tau_i S_i + \rho_G A_G g \sin \beta = 0 \quad (2)$$

Igualando dP/dx nas equações e assumindo que o gradiente hidráulico nas condições de transição é desprezível temos:

$$\tau_G \frac{S_G}{A_G} - \tau_L \frac{S_L}{A_L} + \tau_i S_i \left(\frac{1}{A_L} + \frac{1}{A_G} \right) + (\rho_L - \rho_G) g \sin \beta = 0 \quad (3)$$

A tensão cisalhante é avaliada com U sendo a velocidade média da fase:

$$\tau_L = f_L \frac{\rho_L U_L^2}{2} \quad \tau_G = f_G \frac{\rho_G U_G^2}{2} \quad \tau_i = f_i \frac{\rho_G (U_G - U_L)^2}{2} \quad (4)$$

onde os fatores de atrito das fases avaliados a partir de:

$$f_L = C_L \left(\frac{D_L U_L}{v_L} \right)^{-n} \quad f_G = C_G \left(\frac{D_G U_G}{v_G} \right)^{-m} \quad (5)$$

onde D_L e D_G são os diâmetros hidráulicos calculados como sugerido por Agrawal et al. (1973) :

$$D_L = \frac{4A_L}{S_L} \quad D_G = \frac{4A_G}{S_G + S_i} \quad (6)$$

Isso implica que a resistência do líquido na parede do duto é similar ao caso do escoamento em canal aberto e para o gás é similar ao caso de escoamento confinado em duto.

Transições começam a ser observadas quando $U_G \gg U_i$. A tensão de cisalhamento interfacial no gás é avaliada com a mesma equação da tensão de cisalhamento do gás na parede do duto. Taitel e Duckler utilizaram os seguintes coeficientes: $C_G = C_L = 0.045$, $n = m = 0.2$ para escoamento turbulento e $C_G = C_L = 16$, $n = m = 1.0$ para escoamento laminar.

As equações são então adimensionalizadas, utilizando a variável de referência D para os comprimentos, D^2 para as áreas e as velocidades superficiais U_{LS} e U_{GS} para as velocidades do líquido e gás, respectivamente. Substituindo as equações (4) e (5) na (3) temos:

$$X^2 \left[\left(\tilde{U}_L \tilde{D}_L \right)^{-n} \tilde{U}_L^2 \frac{\tilde{S}_L}{\tilde{A}_L} \right] - \left[\left(\tilde{U}_G \tilde{D}_G \right)^{-m} \tilde{U}_G^2 \left(\frac{\tilde{S}_G}{\tilde{A}_G} + \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{A}_L} + \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{A}_G} \right) \right] - 4Y = 0 \quad (7)$$

onde:

$$X^2 = \frac{\frac{4C_L}{D} \left(\frac{U_{LS} D}{v_L} \right)^{-n} \frac{\rho_L U_{LS}^2}{2}}{\frac{4C_G}{D} \left(\frac{U_{GS} D}{v_G} \right)^{-m} \frac{\rho_G U_{GS}^2}{2}} = \frac{\left| \left(\frac{dP}{dx} \right)_{LS} \right|}{\left| \left(\frac{dP}{dx} \right)_{GS} \right|} \quad (8)$$

$$Y = \frac{(\rho_L - \rho_G)g \sin \beta}{\frac{4C_G}{D} \left(\frac{U_{GS} D}{v_G} \right)^{-m} \frac{\rho_G U_{GS}^2}{2}} = \frac{(\rho_L - \rho_G)g \sin \beta}{\left| \left(\frac{dP}{dx} \right)_{GS} \right|} \quad (9)$$

$(dP/dx)_s$ designa a queda de pressão de uma fase apenas escoando pelo duto. X é o parâmetro introduzido por Lockhart e Martinelli (1949) e pode ser calculado com o conhecimento das vazões, propriedades dos fluidos e o diâmetro do tubo. Y é zero para tubos horizontais e representa as forças relativas, atuando no líquido na direção do escoamento, devidas à gravidade e às perdas de pressão. Todas as variáveis adimensionais com superscript $\sim$ dependem apenas de $\tilde{h} = h/D$. São elas:

$$\tilde{A}_L = 0.25 \left[\pi - \cos^{-1}(2\tilde{h}-1) + (2\tilde{h}-1) \sqrt{1-(2\tilde{h}-1)^2} \right] \quad (10)$$

$$\tilde{A}_G = 0.25 \left[\cos^{-1}(2\tilde{h}-1) - (2\tilde{h}-1) \sqrt{1-(2\tilde{h}-1)^2} \right] \quad (11)$$

$$\tilde{S}_L = \pi - \cos^{-1}(2\tilde{h}-1) \quad (12)$$

$$\tilde{S}_G = \cos^{-1}(2\tilde{h}-1) \quad (13)$$

$$\tilde{S}_i = \sqrt{1-(2\tilde{h}-1)^2} \quad (14)$$

$$\tilde{U}_L = \frac{\tilde{A}}{\tilde{A}_L} \quad (15)$$

$$\tilde{U}_G = \frac{\tilde{A}}{\tilde{A}_G} \quad (16)$$

Fica estabelecido então que as quantidades incluídas nos colchetes da Equação (7) dependem apenas do valor de h/D , e que para cada valor de h/D (existem casos em que temos 2 valores Y para um mesmo valor de X), sempre existirá um par X - Y que resolva a Equação (7). A decisão sobre se o escoamento é laminar ou turbulento em cada fase deve ser baseada no cálculo do número de Reynolds, calculado à partir da velocidade e do diâmetro hidráulico equivalente preenchido por aquela fase, em vez da velocidade superficial e do diâmetro da seção.

2.1.1.2 Transição entre escoamentos estratificado e intermitente

Com o aumento da vazão da fase líquida, o nível (h) desta aumenta e uma onda é formada rapidamente e tende a bloquear o escoamento de gás. Isto se processa em decorrência da diminuição do diâmetro hidráulico do gás, que, em função disto, vê sua velocidade aumentada. De acordo com o efeito de Bernoulli, a pressão é então diminuída neste ponto, o que tende a fazer a onda da fase líquida crescer ainda mais. O equilíbrio entre esta tendência e os efeitos da força da gravidade e das tensões superficiais, que atuam em sentido contrario, é o principio do utilizado no critério de instabilidade de Kelvin – Helmholtz (Milne-Tomsom, 1960). Este princípio, após adimensionalizado estabelece que :

$$F^2 \left[\frac{1}{C_2^2} \frac{\tilde{U}_G^2}{\tilde{A}_G} \frac{d\tilde{A}_L}{d\tilde{h}} \right] \geq 1 \quad C_2 = 1 - \frac{h}{D} \quad (17)$$

onde F é o número de Froude modificado pela razão de densidades:

$$F = \sqrt{\frac{\rho_G}{(\rho_L - \rho_G)}} \frac{U_{GS}}{\sqrt{Dg \cos \beta}} \quad (18)$$

A solução das equações de balanço de momento e de instabilidade de Kelvin – Helmholtz produz os pares U_{GS} U_{LS} formadores da curva de transição entre os escoamentos estratificado e intermitente.

2.1.1.3 Transição entre escoamentos intermitente e anular

A Equação (17) – instabilidade de Kelvin–Helmholtz, apresenta o critério segundo o qual uma onda finita na superfície da interface entre as fases tende a crescer. Nos casos em que o nível da fase líquida é inadequado à formação e manutenção das golfadas, a onda é quebrada e é então estabelecido o escoamento anular, no qual a fase gasosa escoar no interior de um filme adjacente à parede do duto formado pela fase líquida. Isto sugere que o escoamento se desenvolverá intermitente ou anular dependendo apenas da relação $h/D = 0.5\phi$, onde ϕ é a fração de fase do líquido nos pistões formados.

2.1.1.4 Transição entre escoamentos estratificado liso e estratificado ondulado

A formação de ondas estáveis à partir de uma interface estratificada lisa ocorrerá apenas se existir uma fonte de energia para a fase líquida. Em escoamentos horizontais, esta fonte de energia é unicamente o gás. Esta transição ocorrerá se a velocidade do gás for suficiente para causar estas ondas mas menor que o suficiente para provocar o crescimento rápido das ondas e a consequente transição para o padrão anular ou intermitente. A inclinação negativa do duto, no sentido do escoamento, faz com que a componente gravitacional seja presente nesta fonte de energia.

Em termos fenomenológicos, a formação destas ondas se iniciará quando a pressão e o trabalho das tensões de cisalhamento na interface líquida for maior que a dissipação viscosa no fluido. Uma boa descrição deste mecanismo de transferência de energia foi feita por Stewart (1967). Jeffreys (1925, 1926) apresentou o seguinte critério para a formação das ondas:

$$(U_G - C)^2 C = \frac{4v_L g(\rho_L - \rho_G)}{sp_G} \quad (19)$$

onde s é um coeficiente para o qual Benjamin (1959) indicou valores entre 0.01 e 0.03. Este equacionamento utiliza $s=0.1$ e C é a velocidade de propagação das ondas. As transições ocorrem em sua maioria quando $U_G \gg C$. Teorias sobre estas ondas sugerem que a razão entre a velocidade das ondas e a média da velocidade do filme C/U_L decresce com o acréscimo do número de Reynolds do líquido (BROCK, 1970) (CHU, 1973). Em escoamentos turbulentos esta razão fica entre 1.0 e 1.25. Para simplificação, o autor utiliza $U_L = C$ o que leva a:

$$U_G \geq \sqrt{\left[\frac{4\nu_L(\rho_L - \rho_G)g\cos\beta}{s\rho_G U_L} \right]} \quad (20)$$

Que na forma adimensional fica:

$$K \geq \frac{2}{\tilde{U}_G \sqrt{\tilde{U}_L s}} \quad (21)$$

onde K é o produto do número de Froude modificado pela raiz quadrada do número de Reynolds superficial do líquido:

$$K^2 = F^2 Re_{LS} = \left[\frac{\rho_G (U_{GS})^2}{(\rho_L - \rho_G) D g \cos\beta} \right] \left(\frac{D U_{LS}}{\nu_L} \right) \quad (22)$$

Todas as quantidades dependem apenas de h/D .

2.1.1.5 Transição entre escoamentos intermitente e a bolhas

Em configurações onde se têm elevadas velocidades da fase líquida e baixas velocidades da fase gasosa, o nível de equilíbrio da fase líquida se aproxima do topo da tubulação, o que marca a tendência do gás se misturar ao líquido. Nestas condições a transição para o escoamento a bolhas dispersas ocorre quando as flutuações turbulentas são fortes o suficiente para vencer as forças de empuxo que tendem a manter o gás no topo da tubulação.

A força de empuxo por unidade de comprimento pode ser expressa por :

$$F_B = g \cos \beta (\rho_L - \rho_G) A_G \quad (23)$$

Como usado por Levich (1962) a força devida à turbulência pode ser estimada como:

$$F_T = \frac{1}{2} \rho_L \overline{V'^2} S_i \quad (24)$$

onde V' é a flutuação da velocidade radial para a qual a raiz média quadrática é estimada aproximadamente igual à velocidade de fricção :

$$\sqrt{\overline{V'^2}} = U^* = U_L \sqrt{\frac{f_L}{2}} \quad (25)$$

A dispersão do gás é visualizada quando $F_T \geq F_B$, ou

$$U_L \geq \sqrt{\frac{4A_G}{S_i} \frac{g \cos \beta}{f_L} \left(1 - \frac{\rho_G}{\rho_L}\right)} \quad (26)$$

Que na sua forma adimensional fica :

$$T^2 \geq \frac{8 \tilde{A}_G}{\tilde{S}_i U_L^2 \left(\tilde{U}_L \tilde{D}_L \right)^{-n}} \quad (27)$$

onde:

$$T = \sqrt{\frac{4C_L \left(\frac{U_{LS} D}{v_L} \right)^{-n} \frac{\rho_L U_{LS}^2}{2}}{(\rho_L - \rho_g) g \cos \beta}} = \sqrt{\frac{\left| \left(\frac{dP}{dx} \right)_{LS} \right|}{(\rho_L - \rho_g) g \cos \beta}} \quad (28)$$

e T pode ser considerado como a razão entre as forças de turbulência e gravidade atuando no gás.

Quando as bolhas estão dispersas pela ação da turbulência, o escorregamento entre as fases é desprezível, ou seja $U_L = U_G$. Se $U_{GS} = U_G \alpha$ e $U_{LS} = (1 - \alpha)U_L$ onde α é a fração de vazio média podemos formular que

$$U_{LS} = U_{GS} \frac{1 - \alpha}{\alpha} \quad (29A)$$

ou

$$\alpha = \frac{\frac{U_{GS}}{U_{LS}}}{1 + \frac{U_{GS}}{U_{LS}}} \quad (29B)$$

A fração de vazio portanto aumenta com o acréscimo de U_{GS} para um dado U_{LS} . Todavia com $\alpha = 0.52$ tem-se a mistura com a máxima densidade possível de bolhas. Para valores maiores de U_G as bolhas tendem a coalescer, o que em dado momento causa a transição para o escoamento intermitente.

2.1.2 Cálculo do mapa de Taitel & Dukler para o circuito de testes do NETeF

A experimentação neste trabalho consiste na geração de padrões de escoamentos em número e diversidade suficientes para os treinamentos das redes neurais e testes do software de diagnóstico. A geração destes escoamentos é possível através do estabelecimento de vazões convenientemente determinadas para as fases líquida e gasosa presentes no escoamento. A arbitragem das trajetórias – excursões dos pares (U_{GS} , U_{LS}), da mesma forma, é mais eficiente se feita seguindo critérios prévios de seleção. É no objetivo de estabelecer estes critérios, utilizados tanto na condução dos experimentos quanto na avaliação dos resultados, que calcularemos o mapa de escoamentos de Taitel & Dukler específico para circuito de testes do NETeF. Apresentamos nesta seção os métodos e cálculos necessários para o levantamento destes mapas.

Para a obtenção destes mapas foram implementados métodos computacionais baseados no algoritmo de ZBrent para solução de raízes de equações matemáticas. Os códigos foram escritos em ANSI C, compilados e executados em ambiente UNIX. Os códigos estão disponíveis no Apêndice 1 e os resultados obtidos para a tubulação de 30 mm de diâmetro interno – utilizada no escopo deste trabalho - no Apêndice 2.

Os seguintes parâmetros foram utilizados :

ρ_G	=	1.179	kg/m ³
ρ_L	=	995.3	kg/m ³
v_G	=	1.57e-5	m ² /s
v_L	=	7.32e-7	m ² /s
g	=	9.8	m/s ²
D	=	0.03 / 0.022 / 0.021	m;
β	=	0	

A solução das equações de balanço de momento (7), aqui referida por $\phi_1(U_{GS}, U_{LS}, h)=0$ e da instabilidade de Kelvin-Helmholtz (17), aqui por $\phi_2(U_{GS}, h)=0$ conforme descrito na figura 3 resulta nos pares (U_{GS} , U_{LS}) que determinam a região de fronteira entre os escoamentos estratificado e intermitente ou anular.

Figura 3: Diagrama de blocos de solução da transição entre padrões estratificado e intermitente ou anular

A transição entre os padrões intermitente e anular é determinada pelas raízes das mesmas equações $\phi_1(U_{GS}, U_{LS}, h) = 0$ $\phi_2(U_{GS}, h) = 0$, em rearranjo conforme apresentado pela figura 4. Foi descrito na seção 2.1.1.3 que para valores de $\tilde{h}$ maiores que 0.5 tem-se a configuração do padrão intermitente, e abaixo deste valor, o padrão de escoamento anular. A resolução de ϕ_2 com $\tilde{h} = 0.5$ através do método ZBrent resulta num valor mínimo de U_{GS} , chamado aqui U'_{GS} , à partir do qual se pode calcular a raiz de ϕ_1 com $\tilde{h} = 0.5$ para se obter os pares (U_{GS}, U_{LS}) que definem esta transição.

Figura 4: Diagrama de blocos de solução da transição entre padrões intermitente e anular

A transição entre os padrões estratificado liso e estratificado ondulado é de outra forma calculado através da solução das raízes das equações que modelam a relação entre os trabalhos das forças de cisalhamento devidas à pressão e as dissipações viscosas na interface líquido-gás. A figura 5 descreve este esquema, onde a Equação (22) é re-arranjada em $\phi_c(U_{GS}, U_{LS}, h)=0$ e a Equação (7) em $\phi_1^*(U_{GS}, h)$ - reescrita para cálculo de U_{LS} à partir de h e U_{GS} determinados.

Figura 5: Diagrama de blocos de solução da transição entre os padrões estratificado liso e estratificado ondulado

Outra transição calculada é a que determina a fronteira entre os padrões intermitente e a bolhas. Nesta, é assumido que o padrão a bolhas se estabelece quando as forças de flutuações turbulentas são maiores que as forças de empuxo aplicadas nas bolhas em formação – esta condição impede as bolhas de se fundirem em um *slug* de gás. A solução computacional desta transição é então feita conforme descrito pela figura 6, onde a Equação (28) é reescrita em $\phi_D(\phi_1^*, h)=0$ e a Equação (7) em $\phi_1^*(U_{GS}, h)$.

Figura 6: Diagrama de blocos de solução da transição entre padrões intermitente e a bolhas.

As figuras 7, 8 e 9 seguintes apresentam os gráficos de transições entre os padrões de escoamento de objeto de nosso estudo, calculados especificamente para as tubulações das secções de testes do NETeF, considerados escoamento horizontal e diâmetros internos de 30, 22 e 21 milímetros, respectivamente.

Figura 7: Mapa de padrões de escoamento bifásico de Taitel & Dukler para tubulação horizontal e diâmetro interno de 30 mm – NETeF

Figura 8: Mapa de padrões de escoamento bifásico de Taitel & Dukler para tubulação horizontal e diâmetro interno de 22 mm – NETeF

Figura 9: Mapa de padrões de escoamento bifásico de Taitel & Dukler para tubulação horizontal e diâmetro interno de 21 mm – NETeF

2.2 Diagramas tempo-freqüência e a transformada de Gabor

A análise do conteúdo espectral de um sinal baseada apenas na sua transformada de Fourier pode não ser suficiente para descrever um processo ou fenômeno físico à partir do qual este sinal foi extraído. A informação temporal é perdida devido à integração no tempo, isto é, a transformada de Fourier enfatiza toda a informação em termos das freqüências presentes no sinal, em total detrimento dos aspectos temporais. Pode-se dizer que ela omite informações acerca do tempo t em que estas freqüências ocorrem.

Em muitos processos de interesse, as freqüências presentes em seus respectivos sinais variam ao longo do tempo, e esta informação, isto é, as leis de modulação do conteúdo espectral, são da maior importância para a interpretação inequívoca do sinal. Bons exemplos são as linguagens tonais, como o Mandarin Chinês e o Cantonês, nos quais a mudança no timbre de um som leva a palavras completamente diferentes. Assim, o objetivo da análise tempo-freqüência é construir, à partir de um sinal original unidimensional, uma distribuição bidimensional associada a este sinal, capaz de identificar os conteúdos espectrais instantâneos – ou conteúdos locais na vizinhança do tempo de análise. Um bom exemplo disto é o que se pode observar em uma escala musical.

Uma representação do tipo tempo-freqüência pode ser visualizada como uma distribuição de densidade de potência, calculada a partir de um sinal, capaz de identificar suas freqüências e os períodos correspondentes nos quais estas freqüências estiveram presentes. Existem varias alternativas possíveis para se construir este tipo de distribuição. Pode-se definir uma à partir da medida da similaridade – definida pelo produto escalar - entre um sinal genérico $s(\bullet)$ e uma função analisadora $h_{t,\omega}(\bullet)$ bem localizada ao redor do tempo t e da freqüência ω :

$$P(t, \omega) = \langle s, h_{t,\omega} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) h_{t,\omega}^*(\tau) d\tau \quad (30)$$

Diferentes famílias de funções analisadoras levam a diferentes classes de distribuições. Por exemplo, se $h_{t,\omega}(\bullet)$ é gerada à partir transformações afins aplicadas a uma função mãe admissível $h(\bullet)$ qual seja :

$$h_{t,\omega}(\tau) = h\left(\frac{\tau - t}{\omega_0 / \omega}\right) \quad (31)$$

então $P(t, \omega)$ se torna a conhecida Transformada Wavelet. um exemplo de classe afim são as “wavelets” de Y. Meyer (1993) e de I. Daubechies (1992).

A transformada STFT – “Short Time Fourier Transform” – pertence à classe de Cohen e é obtida pela translação no tempo e na frequência da função mãe admissível :

$$h_{t,\omega}(\tau) = h(\tau - t)e^{j\omega\tau} \quad (32)$$

onde $j = \sqrt{-1}$. A transformada de Gabor corresponde a um caso especial de uma STFT na qual a função mãe é a janela Gaussiana, ou seja:

$$h(\tau) = e^{-\alpha\tau^2} \quad (33)$$

onde α é o parâmetro que controla a velocidade de decaimento da janela Gaussiana. Pela aplicação da definição expressa pela Equação (30) obtemos :

$$P(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) e^{-\alpha(\tau-t)^2 - j\omega\tau} d\tau \quad (34)$$

A Transformada de Gabor é uma escolha interessante porque sua função analisadora, a gaussiana, possui o mínimo espalhamento possível. Mais precisamente, pela definição de uma medida do suporte de $h(\bullet)$ e de sua transformada de Fourier $h(\bullet)$ de acordo com :

$$\Delta_h = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} (\tau - t_0)^2 |h(\tau)|^2 d\tau \quad (35)$$

$$\Delta_{\hat{h}} = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} (\tau - \omega_0)^2 |\hat{h}(\tau)|^2 d\tau \quad (36)$$

onde E é a energia do sinal e t_0 e ω_0 respectivamente são seus tempo e frequências centrais. É então possível demonstrar (COHEN,1995) que

$$\Delta_h \Delta_{\hat{h}} = 2\pi \quad (37)$$

onde, para qualquer sinal $s(\bullet)$ diferente da janela Gaussiana, esta relação se torna (GABOR, 1946) :

$$\Delta_s \Delta_{\hat{s}} \geq 2\pi \quad (38)$$

Uma consequência importante disto é que a transformada de Gabor produz uma partição ótima do espaço tempo-frequência através da translação de $h(\bullet)$ em passos T no tempo e Ω na frequência, ou seja :

$$h_{m,k}(\tau) = h(\tau - mT)e^{jk\Omega\tau} \quad (39)$$

onde $k = \pm 1, \pm 2, \dots$ e $m = \pm 1, \pm 2, \dots$. Definindo T e Ω de acordo com :

$$T\Omega = \frac{2\pi}{\beta} \quad (40)$$

se obtém uma partição do plano tempo-frequência que pode ser redundante se $\beta > 1$, exata se $\beta = 1$ ou deficiente se $\beta < 1$. A essa partição pode-se associar os coeficientes de decomposição – chamados de átomos por Gabor :

$$a_{m,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) e^{-\alpha(\tau-mT)^2 - jk\Omega\tau} d\tau \quad (41)$$

que na forma discreta fica :

$$a_{m,k} = \sum_n s(n) e^{-\alpha(n\Delta t - mT)^2 - jk\Omega n\Delta t} \quad (42)$$

onde $s(n)$ é o sinal discreto equivalente do sinal $s(\tau)$.

Neste trabalho, os coeficientes são calculados à partir de sinais de pressão e utilizados para identificar o padrão de escoamento através de uma rede neural previamente treinada. Descrições abrangentes sobre análises no espaço tempo-freqüência podem ser revisadas em Cohen (1995).

2.3 Redes neurais artificiais

As redes neurais podem ser definidas como um mapeamento não linear de um vetor de espaço de entrada para um vetor de espaço de saída. Isto pode ser feito através de camadas de funções de ativação ou neurônios, nos quais coordenadas de entrada são somadas de acordo com o valor de seus respectivos pesos e “bias” para produzir uma saída simples, ativada ou não, de acordo com o seu respectivo nível de disparo. Esta estrutura é conhecida como perceptron e foi proposta originalmente por F. Rosenblatt (1958).

A rede neural artificial utilizada neste trabalho é a do tipo multi-camadas ou “MLP – multi-layer perceptrons” não recursiva, na qual o vetor de entrada de uma camada específica de neurônios é formado apenas pelos valores de disparo da camada precedente. A figura 10 seguinte descreve este tipo de arquitetura.

Figura 10: Representação esquemática de uma rede neural tipo “feed-forward” mapeando um vetor de entrada de 5 coordenadas para um vetor de saída de 3 coordenadas.

Formalmente, se a função de ativação do i -ésimo neurônio na j -ésima camada é indicada por $F_{i,j}(\bullet)$, sua saída s_{ij} é calculada a partir das saídas da camada precedente $s_{i,j-1}$, do “bias” b_{ij} correspondente e dos valores dos pesos $w_{i,k,j-1}$ (o índice k indica o neurônio na camada $j-1$), de acordo com a expressão

$$s_{i,j} = F_{i,j} \left(b_{i,j} + \sum_k w_{i,k,j-1} s_{k,j-1} \right) \quad (43)$$

onde os valores de entrada e saída da rede neural são denotados respectivamente por x_i e h_i , e a relação de mapeamento de um neurônio para outro é calculado sucessivamente pela aplicação da Equação (43). Para a arquitetura da figura 10 resulta que :

$$\eta_i = F_{i,3} \left(b_{i,3} + \sum_{k=1}^4 w_{i,k,2} F_{k,2} \left(b_{k,2} + \sum_{m=1}^5 w_{k,m,1} F_{m,1} \left(b_{m,1} + \sum_{n=1}^5 w_{m,n,0} \xi_n \right) \right) \right) \quad (44)$$

$$i = 1, 2, 3$$

Fica portanto claro pela expressão (44) que a relação entre x_i e h_i é definida inequivocamente pela escolha das funções de ativação e pela atribuição dos valores dos pesos e “bias”. Entre outras propriedades, a rede neural possui uma muito importante que é a capacidade de aprendizado, i.e. a possibilidade de ajuste dos valores de “bias” e pesos através de regras de treinamento convenientes, a fim de reproduzir com relativa precisão valores de pares de entrada/saída pré-estabelecidos (HAYKIN, 1999). O “back-propagation” é provavelmente a heurística de treinamento mais empregada e é particularmente bem aceita para arquiteturas “feed-forward”, desenvolvido independentemente por diversos autores (HAGAN et. al., 1996). Esta heurística é baseada na aplicação iterativa de um algoritmo de otimização segundo a direção dos gradientes máximos, computados à partir da primeira derivada de uma função de erro convenientemente definida com respeito aos parâmetros da rede. Em linhas gerais, os passos básicos do procedimento “back-propagation” são os seguintes:

1. Inicialização dos parâmetros da rede $b_{i,j}$ e $w_{i,k,j}$
2. De um conjunto de dados de treinamento pré-estabelecidos de entrada-saída $(\mathbf{x}_i^p, \mathbf{d}_i^p)$ o algoritmo usa um em específico e forma o par $(\mathbf{x}_i, \mathbf{d}_i)$
3. Cálculo da função de erro de acordo com a norma Euclideana:

$$e = \sqrt{\sum_i (\delta_i^p - \eta_i^p)^2} \quad (45)$$

4. Cálculo das derivadas do erro e em relação a $b_{i,j}$ and $w_{i,k,j}$
5. Modificação dos parâmetros da rede de acordo com a estratégia “steepest descent” e uma taxa de aprendizado α

$$b_{i,j} \leftarrow b_{i,j} - \alpha \frac{\partial e}{\partial b_{i,j}} \quad \text{and} \quad w_{i,k,j} \leftarrow w_{i,k,j} - \alpha \frac{\partial e}{\partial w_{i,k,j}} \quad (46)$$

6. Iteração do passo 2 até o 5, sucessivamente, modificando $b_{i,j}$ and $w_{i,k,j}$, até um número definido de épocas – ciclos de treinamento - ou até que um critério conveniente de parada – por exemplo, um erro aceitável - seja atingido.

A performance de uma rede neural é profundamente afetada pela sua arquitetura interna – o número de camadas intermediárias e o número de neurônios por dada camada – e o tipo de interconexão utilizado, que pode ser o “feed-forward”, a recursiva, o “winner-take-all” entre outros. Apesar da existência destas gamas de possibilidades, não existe uma teoria matemática geral para prever quando construir um modelo específico. Existem todavia alguns métodos empíricos para ajudar nestas avaliações.

A arquitetura utilizada neste trabalho (Figura 10), é baseada no modelo “feed-forward” independente, com $m \times k$ neurônios de entrada, $m_j \times k_j$ neurônios nas camadas intermediárias, n camadas intermediárias e 5 neurônios de saída. Os neurônios da camada de entrada são dispostos em grade, de forma a

acomodar os valores dos pixels da imagem produzida pela distribuição tempo-freqüência de Gabor. A camada de saída foi disposta com 5 neurônios, cada um deles ativado quando seu padrão de escoamento bi-fásico ar-água é diagnosticado. Os cinco padrões associados aos neurônios da camada de saída são os estratificado liso, estratificado ondulado, intermitente, anular e a bolhas dispersas.

A implementação numérica foi feita com auxílio da plataforma SNNS (Stuttgart Neural Network Simulator), descrita em mais detalhes adiante.

3 CIRCUITO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO

Os diferentes padrões de escoamento de interesse deste trabalho foram gerados nas dependências do laboratório do NETeF - Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos da USP – Universidade de São Paulo em São Carlos, Brasil. Nesta seção descreveremos a instrumentação em duas subseções: a da instrumentação de operação da planta e a da instrumentação utilizada para aquisição dos sinais de análise.

3.1 Instrumentação de Operação da Planta da Seção de Testes

O laboratório conta com um aparato construído sobre suporte inclinável (Figura 11) para operar em regime de circuito fechado, com 3 tanques que possibilitam a produção de escoamentos compostos de até 3 fases, a óleo, água e ar. Estes tanques são ligados por bombas a um misturador instalado a montante das tubulações de acrílico transparente. O misturador, por sua vez, pode ser acoplado a 1 de 3 três tubos disponíveis – cada um dos tubos com 12 metros de comprimento e 21, 22 e 30 mm de diâmetro interno respectivamente. Com esta configuração o aparato oferece as condições necessárias para a reprodução de ampla gama de configurações de escoamento.

Figura 11: Seção de testes no NETeF – USP

A figura 12 apresenta o diagrama esquemático do dispositivo e descreve a montagem dos tanques, bombas, compressor, misturador, tubulações e elementos primários de controle.

Figura 12: Diagrama esquemático da seção de testes do NETeF – USP

No diagrama esquemático pode-se ver que a jusante dos tanques estão montadas duas bombas centrífugas, cujos acionamentos são feitos através de inversores de frequência. Seguindo o circuito temos, a jusante das bombas, o misturador, que além da alimentação de óleo e água, recebe também em conexão à montante a alimentação de ar. Este esquema de alimentação paralela de ar se faz através de 3 posicionadores pneumáticos de válvulas (SMAR FY301) acoplados à válvulas de controle (Valtek-P15). Esta arquitetura foi adotada para permitir maiores variações de escala nas estratégias de controle de vazão. O primeiro tramo atua na faixa de 0 a 10 m³/h, o segundo, de 7 a 40 m³/h, e o terceiro, de 30 a 100 m³/h (Figura 13). Os elementos primários de atuação são acionados à partir de estações de transferência automático manual (SMAR AM01P). Estas estações permitem acionamento em modo manual através de seu painel frontal ou em modo automático, no qual o equipamento retransmite proporcionalmente em escala de 4 a 20 mA o sinal de entrada, recebido em escala de 0 a 5 V ou 4 a 20 mA, proveniente do módulo I/O National PXI 1000B. Este último é acoplado a um computador compatível IBM PC, rodando o software LabView, também da National. A planta é então operada à partir de programas escritos na linguagem Labview, que fazem as

operações de entrada e saída, condicionamento dos sinais e interface homem máquina.

As vazões individuais de água, óleo e gás são medidas à partir das pressões diferenciais adquiridas dos elementos deprimogênicos tipo placa de orifício dimensionadas e instaladas nas linhas de acordo com a norma ASME MFC-3M (1989). Estas medições de pressão são transmitidas pelos sensores de pressão diferencial SMAR LD 301 ao módulo National PXI 6025E que os envia ao LabView. Malhas individuais de controle PID foram configuradas no LabView para cada um dos acionamentos (Figura 13).

Figura 13: Instrumentação de operação da planta

Na próxima seção trataremos da instrumentação desenvolvida para o procedimento experimental.

3.2 Instrumentação Experimental

A seção de testes é instrumentada para fornecer sinais de pressão manométrica, pressão diferencial flutuante, sinais provenientes de sensores baseados em tecnologias de ultra-som, anéis capacitivos e indutivos entre outros.

O objetivo de construir um método de diagnóstico à partir de instrumentação disponível no mercado e de baixo custo – para tornar viável adequações à eventuais futuras instalações industriais - nos levou à escolha da aplicação do sinal de pressão flutuante. Para a aquisição e transmissão deste sinal utilizamos o modelo de sensor e transmissor de pressão diferencial Smar LD 400, um modelo de transmissor de resposta rápida.

O transmissor foi acoplado ao duto de acrílico, 6 metros a jusante do misturador. As tomadas de pressão foram posicionadas na parte mais baixa do duto, guardados 20 cm de distância de uma a outra, com a tomada de alta pressão à montante da de baixa (Figura 14). A conexão entre o duto e as tomadas do transmissor é feita através de flexíveis de 0.25” de diâmetro e 25 cm de comprimento cada. Este tipo de montagem possibilita a medição de pequenas diferenças mesmo em dutos de alta pressão. A frequência de corte do sistema transmissor + acoplamento foi medida e é de aproximadamente 15 Hz.

Figura 14: Montagem do transmissor de pressão na seção de testes.

Da mesma maneira que os demais sinais, e utilizando a mesma interface de entrada / saída, este sinal tem sua aquisição e condicionamentos feitos no IBM-PC pelo programa LabView. No próximo capítulo descreveremos os hardwares e softwares utilizados no processamento deste sinais.

4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

É neste capítulo que trazemos de volta ao foco o objetivo principal do trabalho: o de se desenvolver uma solução para uso em tempo real. Esta diretiva nos levou à implementação de códigos proprietários, em detrimento da possibilidade de uso restrito de ferramentas de simulação matemática disponíveis no mercado. A performance de processamento exigida pelos cálculos efetuados em tempo real, em conjunto com as extensivas manipulações de grandes blocos de memória e a portabilidade dos códigos escritos também foram consideradas nesta decisão.

Os trabalhos foram feitos primeiramente na direção dos cálculos computacionais para o levantamento do mapa de escoamentos de Taitel & Dukler, especificamente para o circuito do NETeF. Esta fase é descrita em detalhes na seção 2.2. Isto feito, seguimos com a implementação e testes das ferramentas de processamento dos sinais, experimentação e obtenção dos resultados. As seções seguintes descrevem estas fases em detalhes.

4.1 Desenvolvimento de ferramentas

O software para diagnóstico de padrões de escoamento é descrito pelo diagrama de blocos e esquema apresentados nas Figuras 15 e 16 a seguir. O sinal é adquirido, condicionado e discretizado, após o que, alimenta o módulo de cálculo dos coeficientes da distribuição tempo-frequência de Gabor. Esta distribuição é então enviada como entrada do módulo de simulação da rede neural. Esta última, após convenientemente treinada é capaz de produzir o resultado final, que é o diagnóstico de um entre vários possíveis padrões de escoamento.

Figura 15: Diagrama de blocos da solução

Figura 16: Diagrama esquemático da solução

Estes processamentos demandam uma considerável performance computacional, o que nos fez optar por distribuí-los em dois computadores.

O primeiro deles hospeda os programas escritos em LabView. Estes programas executam os módulos de operação e de aquisição e condicionamento de sinais. A figura 13 na seção 3.1 apresenta a arquitetura de aplicação deste módulo. A figura 17 a seguir apresenta a sua janela gráfica de operação.

Figura 17: Janela LabView para a operação da planta e aquisição e condicionamento de sinais.

Através desta janela gráfica podemos arbitrar, interativamente através de botões e caixas de edição, os valores de referência, ou “set points”, de vazão das fases gasosa e líquida, e também os parâmetros utilizados na aquisição e condicionamento dos sinais experimentais. Os gráficos de tendências, localizados na porção esquerda e inferior da janela, registram em tempo real as variáveis monitoradas e atuadas, e permitem avaliar a qualidade destas medições. Na porção direita e inferior da janela temos o mapa de escoamentos

de Taitel & Dukler, calculado para a seção de 30 mm, à partir dos códigos apresentados na seção 2.2.3. Neste mapa, pode-se observar em tempo de execução, de forma qualitativa, a posição de um par de velocidades U_G e U_L , no eixo x e y respectivamente, relativamente às fronteiras de transição entre os diferentes padrões de escoamento. Também desenhado em tempo real, este mapa auxilia na operação do aparato de testes, habilitando-nos a estabelecer as trajetórias dos pontos (U_G , U_L) de forma conveniente e segundo os objetivos da experimentação. No mapa de escoamentos, o ponto correspondente às vazões instantâneas de ar e de água é marcado dentro de uma das regiões correspondentes aos padrões de escoamento. Esta característica mostrou-se de fundamental importância durante a fase de treinamento da rede neural, porque oferece informação importante, de forma visual e intuitiva, para a geração dos conjuntos de valores de entrada e saída da rede, utilizados nestes treinamentos. Baseado na visualização gráfica da localização dos pares U_{GS} e U_{LS} , pode-se gerar conjuntos voltados para um aprendizado tão generalizado ou especializado quanto se queira.

Os módulos seguintes, destinados à geração dos coeficientes da distribuição tempo-freqüência de Gabor e à execução das redes neurais, foram implementados numa segunda Workstation padrão IBM-PC, rodando uma versão de sistema operacional padrão UNIX. A linguagem de programação escolhida é a ANSI C padrão. As escolhas da linguagem e do sistema operacional, foram feitas desta forma em atendimento às necessidade de performance para processamento em tempo real, disponibilidade de ferramentas e características de portabilidade. Esta última, de vital importância, garante que sejam menores os esforços de migração dos códigos para outras plataformas, como por exemplo Controladores Lógicos Programáveis, Unidades Remotas de Processamento, ou até mesmo outro tipo de CPU e sistema operacional. Migrações deste tipo podem se tornar necessárias em aplicações futuras ou mesmo em uma eventual fase de industrialização do projeto.

As comunicações entre as duas estações foram implementadas utilizando protocolo TCP/IP sobre arquitetura de rede Ethernet. É importante destacar

que este meio de conexão entre as CPUs permite que o processamento seja distribuído local ou remotamente. A única necessidade é que os computadores estejam endereçados e conectados à uma rede TCP/IP válida. Adicionalmente, e para formarmos uma idéia da banda de comunicação necessária, consideremos o caso em que trafeguem dados $x[n]$ à taxa de aquisição de 50 Hz através desta conexão. Temos portanto que fazer chegar à estação de processamento algo da ordem de 50 vezes 4 (número de bytes contidos numa variável de ponto flutuante) vezes 8 (oito bits por byte), ou 1600 bits por segundo. A utilização de outros meios de comunicação pode também ser considerada, como por exemplo, rádio ou par trançado via padrões de comunicação serial RS-232 ou o bem conhecido na indústria RS-485. A figura a seguir descreve a arquitetura geral do sistema.

Figura 18: Arquitetura geral do sistema

Se já temos o módulo de aquisição e condicionamento de sinais definido, o escopo do projeto agora é a construção de um programa para rodar em tempo real que, a cada ciclo, adquira os dados de pressão flutuante $x[n]$, amostrados

e condicionados pelo Labview, calcule os coeficientes da distribuição tempo-frequência através da transformada de Gabor, execute o módulo simulador da rede neural artificial e apresente graficamente as variáveis processadas e os resultados obtidos. As figuras 19 e 20 descrevem um diagrama de fluxo dos dados e um diagrama hierárquico de funções respectivamente. Estes diagramas dão uma idéia geral de como o software foi estruturado e construído.

Figura 19: Diagrama de Fluxo de Dados do Sistema

Figura 20: Diagrama Hierárquico de Funções do Sistema

4.1.1 Desenvolvimento do módulo de cálculo dos coeficientes tempo-freqüência – Transformada de Gabor

Aqui descrevemos a implementação de um módulo de programa escrito em ANSI C, para execução em linha e em tempo real, que recebe como entrada um vetor de valores discretos dos gradientes de pressão $x[n]$. Estes valores são adquiridos e condicionados pelo módulo Labview a uma determinada e configurável freqüência de aquisição f . A aplicação da transformada de Gabor aos vetores $x[n]$ é o objetivo deste módulo. O resultado da execução deste trecho de código é a geração da matriz $a_{m,k}$ de coeficientes tempo-freqüência de Gabor. A Equação (42), na seção 2.2 estabelece esta transformada.

A execução computacional deste equacionamento demanda processamento intensivo de integrações numéricas, somatórias e operações baseadas em números complexos, tornando necessária a implementação de uma biblioteca básica de operações numéricas. Escrevemos essa biblioteca à partir dos conceitos e exemplos apresentados por Press (1999) em “Numerical Recipes in C”. Outro trecho de código importante foi desenvolvido para o gerenciamento das filas de entrada (LANGSAM et al., 1999) dos dados $x[n]$. É neste último trecho de código que fazemos gerenciamento das funcionalidades de tempo real da transformada.

Após os dados de entrada $x[n]$ serem recebidos da fila de entrada é então disparada a execução do código que calcula os coeficientes tempo-freqüência $a_{m,k}$ da transformada de Gabor. Este código é apresentado no seguinte trecho:

```
for(k=0; k< kMax; k++)           // percorre resolucao frequencia
for(n=0; n< xlen; n++)           // percorre vetor x[n]
{
    t = (float)n * dt;
    w = gauss_win(t-tal, alfa );
    teta = (F1+ (float)k* Omega)* t* (2*pi);
    wmk= RCmul( w, Complex_1(cos(teta),sin(teta)));
    if( SubtraiMedia )
        Camk[k]= Cadd( Camk[k], RCmul( ((x[n]-xMean)* dt), Conjg(wmk))
    );
    else Camk[k]= Cadd( Camk[k], RCmul( ((x[n])* dt), Conjg(wmk)) );
}
```

Os trechos de programa para controle da execução foram então escritos, de maneira que os parâmetros f (frequência de aquisição), a (velocidade de decaimento da janela Gaussiana), T (Resolução no tempo), W (resolução em frequência) e o range (intervalo de frequências a ser computado) possam ser ajustados através de janela gráfica e em tempo de execução do programa.

A Figura 21 apresenta esta janela e os seus parâmetros de controle. Nesta janela podemos também observar uma caixa de ajuste para a frequência de testes, que é apresentada no gráfico imediatamente abaixo, seguida de sua modulação pela janela gaussiana deslizante – estas simulações orientam o usuário na determinação de valores coerentes para os parâmetros da transformada de Gabor. Um segundo gráfico, abaixo, apresenta a resolução do plano tempo-frequência no espaço de transformação delimitado pela gaussiana. Ambos os gráficos são redesenhados automaticamente quando da mudança de algum dos parâmetros e, centrados em torno do tempo $t=0$, representam graficamente o espaço matemático sobre o qual a transformada será aplicada.

Botões na base da janela controlam a execução do programa em termos globais. Os botões *NN* e *TF* ativam a execução da rede neural e da transformada de Gabor, respectivamente. *Run* ativa ou desativa a execução do programa como um todo. Os demais são utilizados para posicionamento de dados na fila de entrada, envio e atualização de parâmetros de operação e finalização do programa.

Figura 21: Janela de parâmetros do módulo de execução e controle da transformada de Gabor. Pode-se arbitrar os parâmetros de aquisição e processamento da transformada. Áreas gráficas permitem visualização interativa da modulação entre a janela analisadora gaussiana e a frequência de teste arbitrada.

Uma importante funcionalidade disponível nesta janela de controle que podemos destacar é a área que apresenta o resultado gráfico da modulação entre a janela analisadora gaussiana adotada e uma dada frequência de teste. Para que a janela analisadora seja efetiva em todo o espectro analisado, o parâmetro α (que determina o tempo de decaimento da gaussiana) deve ser tal que a envoltória produzida seja suficiente para acomodar alguns ciclos da menor frequência analisada, ou seja, o limite inferior do range. Ainda na figura 21, na parte inferior, podemos ver o quadriculado que simula as resoluções no tempo e na frequência, nos eixos x e y respectivamente. Estas duas áreas gráficas são atualizadas interativamente, após cada comando de configuração entrado pelo usuário, e permitem prever e sintonizar o comportamento do módulo da transformada de Gabor.

Para a visualização dos resultados da transformada foi implementada uma outra janela gráfica, que é atualizada a cada ciclo de execução do software. Esta janela é apresentada na figura 22. Em sua região superior, temos o gráfico de histórico do sinal de pressão dP/dx no tempo t nos eixos y e x respectivamente. O tempo $t=0$ corresponde à extremidade direita do eixo horizontal e, neste exemplo de configuração, $t = 30$ segundos (passados) corresponde à extremidade esquerda e n , que é o número de amostras adquiridas durante este período, é igual a 1500. A escala de pressão, no eixo vertical, é proporcional à faixa de calibração do LD400, que neste caso é de 0 a 200 mmH₂O. Noutro gráfico, na região inferior da janela, são apresentados os resultados da transformada de Gabor deste sinal. Neste gráfico, que é uma representação dos coeficientes da distribuição tempo-freqüência, temos o índice m relacionado à escala de tempo e representado na escala horizontal do gráfico. Da mesma forma que no gráfico de pressão, $t = 0$ corresponde ao momento atual e está posicionado na extremidade direita do gráfico. Neste exemplo, $m = 60$ equivale ao período de 30 segundos, com resolução $T = 0.5$ s, e está posicionado na extremidade esquerda do gráfico. No eixo vertical temos a representação da escala de freqüências presentes no sinal. Neste exemplo, a transformada de Gabor tem seus parâmetros tais que geram uma escala de análise de 0 a 18 Hz, com resolução $O = 0.5$ Hz. Tem-se então uma matriz de pontos $a[m,k]$, onde, para cada m , que representa um intervalo de tempo (0.5 segundos neste caso), tem-se um vetor de espectro de densidade de energia presente no sinal naquele dado intervalo de tempo. No gráfico inferior à esquerda temos a representação deste espectro para $t = 0$, ou seja, calculado pela mais recente execução da transformada sobre os valores de pressão adquiridos do processo. O gráfico localizado na área superior esquerda da janela representa a curva de Gauss do sinal de pressão de entrada, representando a sua média e desvio padrão, calculados à partir $x[n]$ no intervalo de tempo sobre o qual é aplicada a transformada durante último ciclo de execução.

Figura 22: Janela de apresentação gráfica da pressão dP/dx (0 a 200 mm H₂O) e seus respectivos coeficientes tempo-freqüência, para uma janela de tempo de 30 segundos, $T = 0.5$ s, range de 0 a 18 Hz e $\Omega = 0.5$ Hz.

Estes gráficos são animados através de uma função de *scroll*, que produz o deslizamento horizontal concomitante do gráfico dos sinais de pressão e do gráfico da respectiva distribuição tempo-freqüência, da direita para a esquerda, e tornam a interface bastante intuitiva e didática, conforme ilustrado na figura 22. Ela funciona como uma janela de histórico do sinal e de seus espectros de densidade de energia registrados ao longo do tempo. É através desta janela que o usuário pode avaliar os sinais e os resultados obtidos após seus processamentos. Desta forma pode-se ajustar os parâmetros do sistema interativamente até que se obtenha os melhores resultados. Isto facilita a análise qualitativa da matriz $a[m,k]$, previamente ao processo de alimentação e treinamento do módulo de das redes neurais.

4.1.2 Desenvolvimento do módulo de simulação de redes neurais

Neste módulo, a variável de entrada é uma matriz $a[m,k]$, onde m é o número de espectros com resolução T consecutivos no tempo, k é o número de intervalos com resolução Ω no espectro de freqüências. k/Ω é portanto o intervalo de freqüências analisadas pela transformada de Gabor. A cada ciclo de execução do código essa matriz é atualizada em esquema *FIFO* – “first in, first out”. Uma nova coluna – o último espectro momentâneo calculado - é adicionada e a m -ésima é descartada da matriz de entrada. Durante fase de treinamento da rede neural, a matriz $a[m,k]$ é associada a um padrão de escoamento específico e bem conhecido. Estas informações constituem os pares de padrões de entrada e saída da rede e são utilizados no seu treinamento. Após convenientemente treinada, em tempo de execução a rede neural produz o diagnóstico do padrão de escoamento à partir da matriz $a[m,k]$. Esta arquitetura é descrita pela figura 23 a seguir.

Figura 23: Arquitetura de alimentação da rede neural artificial

O processo de treinamento da rede consiste basicamente na construção dos pares de entrada / saída (a_{m,k_i}^P, s_i^P) , onde para cada entrada, que aqui pode ser visualizada como uma porção – a mais recente – do plano tempo-freqüência é atribuída um vetor equivalente de saída desejada, correspondente ao padrão de escoamento observado. Para controlar tal processo implementamos uma janela gráfica à partir da qual o usuário “informa” ao sistema qual é o padrão de escoamento fisicamente presente na tubulação (Figura 24).

Figura 24: Janela de ajuste dos parâmetros da rede neural

Após a construção os conjuntos de pares para treinamento, segue-se o projeto e implementação da arquitetura da rede neural, onde especificamos suas características como o número de neurônios nas camadas de entrada, número de camadas intermediárias, dimensionalidade, número de neurônios em cada camada intermediária e o número de neurônios da camada de saída. Esta fase e o treinamento subsequente são ambos efetuados através do simulador de redes neurais SNNS – “Stuttgart Neural Network Simulator” (<http://www-ra.informatik.uni-tuebingen.de/SNNS>), em sua versão 4.3 para sistema

operacional Unix e ambiente gráfico de janelas “X Window”. Após efetuado o treinamento – que pode ser iterativo através das janelas gráficas do sistema (Figura 25) ou em processo de batelada executadas em *background* – a rede e os respectivos vetores de “bias” e pesos, $b_{i,j}$ e $w_{i,k}$, são então ligados aos demais módulos para compor o aplicativo de diagnóstico em tempo real. À partir desta configuração, com a arquitetura da rede neural definida, torna-se possível o re-treinamento “on-line” da rede. Para isto seria necessária a implementação de alguns programas batch e lógicas adicionais, cuja demanda de esforços seria perfeitamente viável em uma eventual industrialização do projeto.

Figura 25: Ambiente operacional do SNNS, com as janelas de controle, treinamento, gráfico de convergência, arquitetura e níveis de disparo de cada neurônio.

4.1.3 A solução integrada

Realizadas as fases anteriormente descritas, esta seção descreve a integração de todos os módulos escritos em uma única aplicação, capaz de atender ao objetivo do trabalho, que é o de identificar “on-line” o padrão de escoamento bifásico horizontal à partir dos sinais de pressão dP/dx adquiridos diretamente do escoamento. O encadeamento dos módulos de aquisição e condicionamento de sinais, da transformada de Gabor e da rede neural artificial treinada produziu como resultado a solução capaz de executar esse diagnóstico. Para os testes, pudemos produzir estes padrões fisicamente e de maneira inequívoca na seção de testes do laboratório.

Para a visualização em tempo de execução destes resultados, foi adicionado à parte inferior da janela de interface descrita na seção 4.1.1 (Figura 22) um gráfico para a apresentação dos valores dos vetores de saída da rede neural h_i para um dado ciclo de cálculo m . Esta janela (Figura 26) passou a integrar então a visualização dos gráficos de tendência dos sinais de gradientes de pressão, seus respectivos coeficientes tempo-freqüência e as saídas do simulador de redes neurais, i.e., a identificação do padrão de escoamento. Neste último, as linhas em verde correspondem aos padrões de escoamento desativados pela rede neural, que são os que a rede inferiu não estarem presentes no momento de sua análise. Os valores em vermelho por sua vez representam os estados que a rede inferiu estarem presentes naqueles momentos. Da mesma forma que os demais gráficos de tendência, este armazena também um histórico animado em tempo real onde é possível inclusive observar as transições entre um padrão de escoamento e outro. É importante destacar que a expressão “tempo real” é usada no sentido de que o diagnóstico é feito continuamente, porém, há um atraso entre o fenômeno físico e o seu diagnóstico. Este atraso é inerente à análise de tempo freqüência e é proporcional à extensão da janela de análise (definida pelo parâmetro α) na equação (42). Tipicamente em torno de 2 ou 3 segundos, este atraso no diagnóstico é aceitável se considerarmos a dinâmica destes escoamentos. A figura 26 apresenta como exemplo os resultados obtidos pelo sistema no

período em que houve uma transição entre o padrão de escoamento estratificado liso e estratificado ondulado. O respectivo tempo de atraso entre as mudanças no sinal e a mudança no diagnóstico pode ser notado.

Figura 26: Janela de identificação do padrão de escoamento. De cima para baixo: pressão dp/dx , coeficientes tempo-frequência e as saídas da rede neural (em verde, e em zero quando inativas e em vermelho, e em 1, quando ativadas).

Além da visualização “on-line” o sistema gera alguns arquivos com os históricos dos resultados obtidos no tempo. Estes arquivos serão então utilizados para uma análise mais minuciosa dos resultados obtidos nas próximas seções.

5 TESTES EXPERIMENTAIS

Os conjuntos de entradas e saídas da rede neural foram gerados à partir de vários sinais de pressão flutuante adquiridos na seção de testes do NETeF. Para a constituição de conjuntos representativos de cada um dos padrões de escoamento, estabelecidos visualmente, foram geradas várias combinações de velocidades superficiais de ar e água, os pares (U_{GS} , U_{LS}), de forma a abranger as possíveis existências de sub-padrões desconhecidos. Ocorrências deste tipo são comuns no padrão de escoamento intermitente, conforme descrito por Klein et al. (2004).

A aquisição foi feita a 50 Hz, durante um período mínimo de 20.48 segundos, que correspondem a um mínimo de 1024 amostras. Alguns escoamentos bifásicos são caracterizados por frequências muito baixas, por exemplo os intermitentes de baixa velocidade, nos quais a frequência de intermitência pode ser tão baixa quanto 0.25 Hz, em linhas de 50 milímetros de diâmetro. Estas frequências demandaram períodos de aquisição maiores, de até 16384 amostras, ou 327.7 segundos. Trechos destes sinais foram utilizados para o treinamento da rede. Posteriormente a rede foi testada “on-line” no circuito experimental do NETeF para a verificação qualitativa do seu desempenho, que, conforme se pode inferir das figuras 29, 30 e 31, é bastante satisfatório. A avaliação quantitativa do desempenho da rede foi feita com uma nova base de sinais, amostrados de forma a representar todos os padrões de escoamento, e é discutida no próximo capítulo.

A figura 27 mostra a região do mapa de Taitel & Dukler à partir da qual os sinais foram adquiridos, delimitada pelas vazões máximas alcançadas pela bomba e pelo compressor. Os limites inferiores – indicados pelas linhas tracejadas – estão associados à estabilidade de operação da planta em regime permanente e estabelecem as mínimas vazões possíveis para a manutenção deste critério. Esta estabilidade está relacionada com a resolução dos medidores de vazão e dos algoritmos PID implementados nas malhas de controle.

Figura 27 : Mapa de Taitel & Dukler calculado para a seção de testes do NETeF. A região tracejada delimita o espaço de amostragem e operação efetiva da planta, com seus limites definidos pela potência do compressor e pela região de operação estável das bombas.

Os parâmetros intrínsecos da transformada de Gabor dos sinais de pressão foram determinados após varias análises exploratórias, durante as quais otimizamos a performance do sistema, considerando a eficiência computacional e o percentual de identificação correta dos padrões de escoamento. Mais especificamente, uma partição redundante do plano tempo-freqüência foi escolhida, com $\beta = 8$, $T = 0.5$ s e $\Omega = 1.57$ rad/s (= 0.5 Hertz). A velocidade de decaimento da janela Gaussiana foi ajustada para $\alpha = 0.73$ s⁻¹, o que resultou em coeficientes 10 (N_1) e 36 (N_2) nas direções do tempo e freqüência, respectivamente. O número total de coeficientes tempo-freqüência dado pela Equação (41) equivale ao número de neurônios na camada de entrada da rede neural, e resultou em 360, ou seja, 10 espectros instantâneos com 36 amplitudes de freqüência cada.

Os pares de entrada-saída (a_{m,k_i}^P, d_i^P) da rede neural foram gerados de forma interativa e on-line na seção de testes. Assim foi possível a formação de um conjunto para treinamento generalizador, com aproximadamente 20 minutos de sinais para cada um dos padrões de escoamento. Várias combinações de vazões U_{GS} e U_{LS} , representativos de um mesmo padrão, foram gerados para garantir esta generalização. O treinamento da rede neural artificial foi feito então, de forma supervisionada, através do aplicativo SNNS em aproximadamente 2000 épocas, necessárias para se atingir um erro igual a 0.01, conforme o estabelecido pela Equação (45), em versão normalizada. A figura 28 apresenta o gráfico de convergência do erro.

Figura 28 : Gráfico SNNS de convergência de erro no treinamento da rede neural. O eixo x mostra o número de épocas do algoritmo de treinamento e o y mostra o erro relativo.

Após a rede ter sido treinada, seus coeficientes e arquitetura são exportados e integrados à aplicação final. Vários padrões de escoamento foram então produzidos na seção de testes e expostos ao sistema para diagnóstico. Alguns exemplos de sinais de gradientes de pressão, com seus respectivos coeficientes tempo-frequência e algumas janelas com resultados da identificação de padrão de escoamento bifásico produzidos pela aplicação são apresentados nas Figuras 29, 30 e 31.

Figura 29: Sinais de pressão, seus respectivos coeficientes tempo-frequência e as saídas da rede neural durante transição entre os padrões anular e a bolhas. A janela total de tempo apresentada é de 30 segundos.

A Figura 29 apresenta a resposta do sistema a uma transição entre os regimes anular e a bolhas. Durante esta transição podemos notar que as demais saídas permanecem inalteradas, em zero. Apenas as duas saídas correspondentes aos escoamentos em transição se alternam, de forma que se pode ver claramente o momento em que a saída da rede neural correspondente ao escoamento anular, ativada anteriormente, começa sua excursão até zero, ao mesmo tempo em que a saída equivalente ao escoamento a bolhas sai de zero até chegar a 1. O tempo desta transição pode ser observado entre 2 e 3 segundos. À direita, pode-se observar uma instabilidade entre as saídas da rede correspondentes aos regimes a bolhas e intermitente, refletindo uma instabilidade física no escoamento devido à proximidade dos pares (U_{GS} , U_{LS}) da região de fronteira de transição entre estes padrões.

Figura 30: Sinais de pressão, seus respectivos coeficientes tempo-freqüência e as saídas da rede neural durante transição entre os padrões a bolhas e intermitente. A janela total de tempo apresentada é de 30 segundos.

Da mesma forma, a Figura 30 apresenta a resposta do sistema a uma transição entre os regimes a bolhas e intermitente. Durante esta transição podemos notar que todas as saídas permanecem inalteradas, em zero, com exceção das saídas correspondentes aos escoamentos a bolhas, intermitente e anular. Este último, apesar de não diagnosticado na transição, sofre uma leve alteração de seu estado de inatividade, em função novamente do fato do escoamento, composto pelos pares (U_{GS} , U_{LS}), estar próximo à região de tríplice fronteira entre estes escoamentos (a bolhas, intermitente e anular). Esta região de fronteira tripla pode ser observada no mapa de escoamentos de Taitel & Dukler da figura 7. A transição entre o regime a bolhas e intermitente ocorre de forma semelhante à observada na figura anterior, com as saídas correspondentes aos dois escoamentos se alternando em aproximadamente 2 ou 3 segundos. A figura 31 apresenta os sinais s , seus coeficientes tempo-freqüência e saídas da rede neural durante operação em escoamento anular, em regime permanente.

Figura 31: Sinais de pressão, seus respectivos coeficientes tempo-frequência e as saídas da rede neural em diagnóstico de padrão anular. A janela total de tempo apresentada é de 30 segundos.

A próxima seção discute e analisa com mais profundidade os resultados obtidos nestes testes.

6 RESULTADOS

O desempenho da metodologia proposta para a identificação do padrão de escoamento pode ser aferida de várias maneiras. Lembramos que os valores alvos da identificação são exclusivamente 1 ou 0 – o que estabelece se determinado padrão está ou não presente -, e que os valores obtidos nas saídas da rede variam continuamente entre estes limites. A metodologia de aferição proposta, os resultados obtidos na prática experimental e suas aferições serão apresentados nesta seção.

Em termos de seus diagnósticos, cada padrão de escoamento é representado por um ponto $\mathbf{h} \in \mathfrak{R}^5$, onde seus componentes $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5$ correspondem a cada uma das saídas treinadas da rede neural. Para cada padrão i , a saída equivalente ideal da rede deve ser tal que $\eta_i = 1$ e as demais saídas nulas.

Conforme abordagem feita por Seleghim (2002), este tipo de rede neural pode ser interpretada formalmente como uma aplicação não linear, ordenada e suavizada que relaciona dados com alta dimensionalidade aos elementos de um espaço vetorial ordenado de dimensão pequena. Neste caso específico, temos uma aplicação em que o mapeamento dos possíveis conjuntos de coeficientes tempo-freqüência $[a] \in \mathfrak{R}^{M \times K}$ - calculados à partir do sinal de pressão flutuante adquirido do escoamento – leva a um conjunto $\mathbf{h} \in \mathfrak{R}^5$ geometricamente representativo da informação contida nos dados primários. Na medida em que a análise direta destes resultados se torna impraticável devido à complexidade e dimensão dos dados, justifica-se o emprego de métodos matemático-numéricos como os de agrupamento (“clusterização”) de dados. Desta forma, uma realização do escoamento é representada por um ponto no espaço de caracterização e, por sua vez, um padrão de escoamento é caracterizado por um aglomerado (“cluster”) característico de pontos.

Para a avaliação da dispersão destes aglomerados de pontos $\mathbf{h}$ no espaço $\mathfrak{R}^5$ ao redor dos pontos de diagnósticos ideais $(1,0,0,0,0), (0,1,0,0,0), \dots, (0,0,0,0,1)$ torna-se conveniente a definição uma função de erro como segue:

$$\left. \begin{aligned}
 e_{\text{estratif}} &= \sqrt{(1-\eta_1)^2 + (0-\eta_2)^2 + (0-\eta_3)^2 + (0-\eta_4)^2 + (0-\eta_5)^2} \\
 e_{\text{ondulado}} &= \sqrt{(0-\eta_1)^2 + (1-\eta_2)^2 + (0-\eta_3)^2 + (0-\eta_4)^2 + (0-\eta_5)^2} \\
 e_{\text{interm}} &= \sqrt{(0-\eta_1)^2 + (0-\eta_2)^2 + (1-\eta_3)^2 + (0-\eta_4)^2 + (0-\eta_5)^2} \\
 e_{\text{bolhas}} &= \sqrt{(0-\eta_1)^2 + (0-\eta_2)^2 + (0-\eta_3)^2 + (1-\eta_4)^2 + (0-\eta_5)^2} \\
 e_{\text{anular}} &= \sqrt{(0-\eta_1)^2 + (0-\eta_2)^2 + (0-\eta_3)^2 + (0-\eta_4)^2 + (1-\eta_5)^2}
 \end{aligned} \right\} \stackrel{?}{\leq} e_{\text{limit}} \quad (47)$$

Estes limites de erro podem ser visualizados para cada um dos padrões de escoamento como regiões do espaço $\Re^5$ dentro das quais o sistema deve operar. A título de exemplo, para entendermos o significado destas definições, se fizermos uma simplificação da Equação (47) para $\Re^3$ – supondo uma rede treinada para decidir entre apenas 3 diagnósticos – torna-se possível a visualização gráfica destas regiões conforme apresentado na figura 32. Neste caso, as regiões de diagnóstico correto são descritas como esferas centradas em (1,0,0) (0,1,0) e (0,0,1) e com raios iguais aos erros erro_{η_1} , erro_{η_2} e erro_{η_3} , respectivamente. De acordo com esta metodologia de aferição serão consideradas corretas as ocorrências (η_1, η_2, η_3) , contidas dentro destas regiões.

Figura 32: Visualização gráfica da função de erro simplificada para $\mathcal{R}^3$.

É importante ressaltar que estes erros podem ser calculados em linha e em tempo real para cada passo de diagnóstico e assim monitorados com relação aos limiares de detecção e_{limit} . Em outras palavras, um padrão de escoamento específico é identificado se o seu sinal de erro correspondente for menor que um valor de e_{limit} predefinido convenientemente. A certeza deste procedimento de identificação de um determinado padrão pode ser definida como o número de diagnósticos corretos dividido pelo número total de sinais amostrados do mesmo padrão, identificados visualmente (a carta de Taitel & Dukler é utilizada como referência qualitativa). Obviamente, quanto maior for o limite de identificação, maior é a certeza e vice-versa, tendendo a zero com $e_{\text{limit}} = 0$. Os resultados obtidos neste trabalho são apresentados na Tabela (1), onde podemos ver que 100% de certeza é atingida para $e_{\text{limit}} = 0.09$, o que corresponde a uma performance extremamente boa. É também possível notar que os padrões de escoamento intermitente foram identificados com grande certeza para outros e_{limit} . Isto pode ser atribuído à assinatura no diagrama tempo-freqüência muito característica deste tipo de escoamento, dominada pela freqüência de intermitência. Este é igualmente o caso dos escoamentos

estratificados ondulados, que também têm uma assinatura no diagrama tempo-frequência fortemente marcada pela frequência de oscilação da interface de estratificação, resultando na segunda melhor certeza de identificação. As menores certezas foram obtidas para os escoamentos anulares, o que pode ser provavelmente explicado pelo fato de que estes escoamentos foram amostrados muito próximos das regiões das transições com os padrões intermitente e estratificado, devido às limitações na vazão máxima de ar fornecida pelo compressor.

Tabela 1: Níveis de certeza na identificação do padrão de escoamento em relação aos diferentes níveis de identificação da Equação (47)

Limites de identificação	Padrões de Escoamento ?	Estratificado liso	Estratificado ondulado	intermitente	A bolhas	anular
	Número amostras ?	320	875	2098	313	348
0.09	Acertos	320	875	2098	313	348
	Erros	0	0	0	0	0
	Certeza	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
0.08	Acertos	320	874	2098	313	348
	Erros	0	1	0	0	0
	Certeza	100 %	99.89 %	100 %	100 %	100 %
0.07	Acertos	317	871	2094	313	348
	Erros	3	4	4	0	0
	Certeza	99.06 %	99.54 %	99.81 %	100 %	100 %
0.06	Acertos	308	853	2060	307	335
	Erros	13	6	38	6	13
	Certeza	96.25 %	97.49 %	98.19 %	98.08 %	96.26 %
0.05	Acertos	297	831	2008	298	295
	Erros	23	44	90	15	53
	Certeza	92.81 %	94.97 %	95.71 %	95.20 %	84.77 %
0.04	Acertos	281	788	1931	268	261
	Erros	39	87	167	45	87
	Certeza	87.81 %	90.06 %	92.04 %	85.62 %	75 %
0.03	Acertos	264	746	1858	239	216
	Erros	56	129	240	74	132
	Certeza	82.5 %	85.26 %	88.56 %	76.36 %	62.07 %
0.02	Acertos	248	689	1764	199	173
	Erros	72	186	334	114	175
	Certeza	77.5 %	78.74 %	84.08 %	63.58 %	49.71 %
0.01	Acertos	200	541	1541	139	95
	Erros	120	334	557	174	253
	Certeza	62.5 %	61.83 %	73.45 %	44.40 %	27.30 %
0.005	Acertos	128	395	1176	60	40
	Erros	192	480	922	253	308
	Certeza	40 %	45.14 %	56.05 %	19.17 %	11.49 %
0.001	Acertos	5	26	143	0	0
	Erros	315	849	1955	313	348
	Certeza	1.56 %	2.97 %	6.82 %	0 %	0 %

Para efeito de visualização gráfica destes resultados, novamente é conveniente fazermos uma simplificação do espaço $\mathfrak{R}^5$ do espectro de diagnósticos possíveis para $\mathfrak{R}^3$, desta forma, visualizável em gráficos de 3 dimensões. Apesar da perda de informação inerente a esta simplificação, a melhor visualização destes clusters de informação é a representação gráfica combinada em três eixos – cada eixo equivale a uma saída da rede neural - dos resultados obtidos. Disto resultaram portanto duas figuras. Na primeira delas, a Figura 33, são apresentadas as saídas da rede neural correspondentes aos padrões estratificado, ondulado e intermitente. Da mesma forma, na Figura 34 são apresentados os valores das saídas correspondentes aos diagnósticos dos padrões de escoamento a bolhas, anular e, novamente, o intermitente. Arbitramos a presença do escoamento intermitente nas duas figuras devido ao fato deste estar fisicamente próximos dos padrões estratificado e ondulado, cujos clusters são descritos na figura 33 e com os escoamentos a bolhas e a anular, nos clusters descritos na figura 34.

Figura 33: Visualização gráfica da distribuição das saídas da rede neural combinadas para os diagnósticos de padrão estratificado, estratificado ondulado e intermitente.

Figura 34: Visualização gráfica da distribuição das saídas da rede neural combinadas para os diagnósticos de padrão a bolhas, anular e intermitente.

Pode-se observar pela análise da dispersão destes clusters que existe um valor de erro limite dentro do qual o percentual de acerto da aplicação é de 100%. Desta observação decorre outra, a de que em nenhum caso de diagnóstico i houve uma saída $\eta_i < \eta_j, j \neq i$, ou seja, em nenhum dos casos testados a rede apontou para um padrão de escoamento (ou cluster relacionado a este padrão) diferente daquele observado fisicamente. Outra característica interessante dos resultados obtidos é a inexistência de pontos dispersos entre os clusters de classificação. Estes clusters, por sua vez, estão inequivocamente confinados na vizinhança de seus centros ideais. Esta característica se torna de grande relevância em termos qualitativos e quantitativos tendo em mente o atendimento ao objetivo de se construir uma ferramenta de detecção em linha e em tempo real. A absoluta concentração dos resultados em clusters distintos e

distantes uns dos outros no espaço de diagnóstico simplifica a decisão sobre qual o padrão a ser anunciado. Desta forma, torna-se desnecessária a implementação de trechos de código subseqüentes para análise dos resultados nos casos em que ocorram a sobreposição ou proximidade de clusters e / ou dispersão dos resultados. Estes códigos poderiam ser complexos e, na mesma medida, os seus erros inerentes poderiam diminuir a confiabilidade do diagnóstico.

Outra característica interessante pode ser constatada através da observação das regiões ampliadas dos clusters de pontos nas figuras 33 e 34. Em todas as regiões de concentração pode ser visto que todas as saídas η_i “perdedoras” da rede neural tiveram seus menores valores atribuídos a zero ou ligeiramente maiores que zero. Da mesma maneira, todas as saídas η_i “vencedoras” tiveram seus valores atribuídos a 1,0 ou ligeiramente menores. Em nenhum caso a rede neural produziu saídas fora do intervalo [0,1]. Esta característica pode ser atribuída como decorrente da função de ativação de saída dos neurônios utilizada nesta configuração de rede neural. A função que utilizamos é predefinida no SNNS como “logistic activation function”, e é estabelecida à partir da conhecida função sigmóide, que é definida como

$$y = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (48)$$

onde:

x é o valor de entrada da função e

y é o seu valor de saída

A função de ativação logística, por sua vez definida no SNNS como

$$a_j(t+1) = \frac{1}{1 + e^{-\left(\sum_i w_{ij} o_i(t) - q_j\right)}} \quad (49)$$

onde:

$a_j(t)$ é a função de ativação do neurônio j no tempo t;

w_{ij} é o peso da conexão entre os neurônios i e j ;

$o_i(t)$ é o valor da saída do neurônio i no tempo t ;

θ_j é o “bias” do neurônio j

é utilizada neste trabalho como o mecanismo de ativação em todos os neurônios da rede, inclusive na camada de saída, o que explica portanto os padrões de dispersão observados nos resultados apresentados. Da função logística são esperados valores de saída dos neurônios que tendem a 0 quando $(\sum_i w_{ij} o_i(t) - q_j) \rightarrow -\infty$ e tendem a 1 quando $(\sum_i w_{ij} o_i(t) - q_j) \rightarrow +\infty$. Ver figura 35 abaixo

Figura 35: Função sigmóide de ativação neural. Utilizada uniformemente em todos os neurônios da rede.

Vale observar que se pode configurar grupos, camadas ou neurônios independentemente, com diferentes funções de ativação, estabelecidas previamente no SNNS ou definidas pelo usuário em linguagem padrão ANSI C. Variações neste sentido podem ser consideradas em eventuais explorações futuras para efeito de otimização ou industrialização do projeto.

7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Foi desenvolvido neste trabalho um procedimento para identificação em linha e em tempo real de padrões de escoamentos gás-líquido. O procedimento foi baseado na aquisição de sinais de gradientes de pressão – pressão flutuante – e nas suas subseqüentes decomposições em coeficientes tempo-freqüência associados à transformada de Gabor, seguido pelas suas análises através de uma rede neural previamente treinada. Testes experimentais foram feitos para validar e aferir a performance do procedimento proposto de identificação.

Nestes testes foram gerados diferentes padrões de escoamento ar-água no circuito experimental do laboratório do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos da Universidade de São Paulo em São Carlos. A seção de testes utilizada possui 12 metros de comprimento e 30 mm de diâmetro interno. O procedimento de treinamento da rede neural se constituiu da aquisição dos sinais de pressão à partir de padrões de escoamento conhecidos e em se igualando as saídas desejadas da rede à zero, exceto para o neurônio correspondente ao padrão selecionado, o qual é igualado a um. Foram coletadas um total de 3954 amostras, à partir de todos os diferentes padrões para a composição do conjunto de treinamento.

Este conjunto de amostras permitiu também a avaliação da performance do procedimento proposto, particularmente no que se refere à certeza associada com a identificação de cada padrão de escoamento. Uma certeza total de 100% é atingida quando o nível de identificação é atribuído a 0.09 na Equação (47). Os padrões intermitente e estratificado ondulado foram identificados com maior certeza, o que pode ser atribuído às suas assinaturas características no tempo-freqüência, associadas com a freqüência de intermitência e oscilação de interface, respectivamente. Os menores índices de certeza foram obtidos para o escoamento anular, provavelmente porque este padrão foi sub-explorado devido às limitações na vazão máxima de ar fornecida pelo compressor.

Estes resultados se mostraram extremamente promissores, e representam uma importante contribuição para a área - fortemente marcada pela multidisciplinaridade - de aplicações em monitoração de escoamentos multifásicos industriais. É importante também ressaltar que as baixas incertezas aferidas são bastante encorajadoras no que se refere às possibilidades de uso industrial deste método.

Trabalhos futuros podem incluir novos experimentos com diferentes inclinações da seção de testes e também a detecção de anomalias, como uma ruptura na tubulação, por exemplo. Seria igualmente interessante o estudo da influência da densidade da partição do plano tempo-frequência, dado pelo β na Equação (40), do número de neurônios das camadas escondidas do modelo neural e variações de funções de ativação dos neurônios na performance global do procedimento de identificação.

REFERÊNCIAS

- ASME MFC-3M (1989). Measurement of fluid flow in pipes using orifice, nozzle, and venturi. 68p.
- AGRAWALL, S. S.; GREGORY, G. A.; GOVIER, G. W. (1973). An analysis of horizontal stratified two-phase flow in pipes. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.51, p.280.
- ANGELI, P.; HEWITT, G. F. (1998). Pressure gradient in horizontal liquid-liquid flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 24, pp. 1183-1203.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (1995). Computational Pipeline Monitoring. *API Publication 1130*.
- API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (1995). Evaluation Methodology for Software Based Leak Detection Systems. *API Publication 1155*.
- BANNWART, A. C. (2001). Modeling aspects of oil-water core-annular flows. *Journal of Petroleum Science And Engineering*, 32 (2-4): pp.127-143.
- BANNWART, A. C.; RODRIGUEZ, O. M. H.; DE CARVALHO, C. H. M.; WANG, I. S.; OBREGON VARA, R. M. (2004). Flow Patterns in Heavy Crude Oil-water Flow. *Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the ASME*, 126, pp. 184-189.
- BENJAMIN, T. B. (1959). Shearing flow over a wavy boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, v.6, p.161.
- BROCK, R. R. (1970). Periodic permanent roll waves, *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, v.96, HYD -12, p.2565.

-
- CHU, K. T. (1973). Statistical characteristics and modeling of wavy liquid film in vertical two-phase flow, *Ph.D. Thesis, University of Houston, Texas – USA*.
- COHEN L. (1995). Time frequency analysis. *Prentice-Hall, Englewood Cliffs*.
- CRIVELARO, K. C. O. (1999). Identificação de regimes de escoamento bifásico horizontal com auxílio de redes neurais. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo*.
- CRIVELARO, K. C. O.; HERVIEU, E.; SELEGHIM JR., P. (2002). Identification of horizontal two-phase flow regimes through a neural network models. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*. , v.14, n.1, p.1–16.
- DAUBECHIES, I. (1992). Ten lectures on wavelets. *SIAM, Philadelphia*, 348p.
- DRAHOS, J.; CERMÁK, J. (1989). Diagnostics of gas-liquid flow patterns in chemical engineering systems. *Chemical Engineering Processes*, Vol. 26, pp. 147-164.
- FRANCA, F.; ACIKGOZ, M.; LAHEY JR., R.T.; CLAUSSE, A. (1991). The use of fractal techniques for flow regime identification. *International Journal on Multiphase Flow* Vol. 17, N°4, pp. 545-552.
- GABOR, D. (1946). Theory of Communication. *J. IEE*, Part III, London, p. 429-457.
- HAGAN, M.T.; DEMUTH, H.B.; BEALE, M. (1996). Neural Network Design. *Boston PWS*.
- HAYKIN, S. (1994). Neural network a comprehensive foundation. *Macmillan College* :New York.

HERVIEU, E.; LEDUCQ, D. (1991). The wavelet transform as a diagnostic tool in two-phase flows : characterisation of multiphase flows from wall measurements. *European Two-Phase Flow Group Meeting*: Rome.

HERVIEU, E.; SELEGHIM, P. (1998). An objective indicator for two-phase flow pattern transition. *Nuclear Engineering. Design*, Vol. 184: (2-3), pp. 421-435.

HUBBARD, M. G.; DUKLER, A. E. (1966). The characterization of flow regimes for horizontal two-phase flow. *Proc. Heat Transfer and Fluid Mech.* Institute. Stanford University Press - M.A. Saad & J.A. Moller eds.

JEFFREYS, J. (1925). On the formation of water waves by wind. *Proc. Royal Soc.* A107, p.198.

JEFFREYS, J. (1926). On the formation of water waves by wind. *Proc. Royal Soc.*, A110, p.241.

KANDEL, A.; LANGHOLZ, G. (1992). Hybrid architectures for intelligent systems. *CRC Press*, 420 p.

KLEIN, F. L.; SELEGHIM JR., P.; HERVIEU, E. (2004). Time-Frequency Analysis of Intermittent Two-Phase Flows in Horizontal Piping. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, accepted for publication.

LAMB, H. (1932). Hydrodynamics. Ed. 6, *Dover Publications*, New York, 738 p.

LANGSAM, Y.; AUGESTEIN, M. J.; TENENBAUM, A. M. (1999). Data structures using C and C++ second edition, *Prentice Hall*, 672p.

LEVICH, V. G. (1962). Physicochemical Hydrodynamics. *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.*

-
- LEWIN, D. R.; FAIGON, M.; FUCHS, A.; SEMIAT R. (1992). Modelling and control of two-phase systems. *Compututational Chemical Engineering*, Vol. 16, N°6, pp.5149-5146.
- LOCKHART, R. W.; MARTINELLI, R. C. (1949). Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. *Chem Eng. Progress*, v.45, p.39.
- MATSUI, G. (1984). Identification of flow regimes in vertical gas-liquid two-phase flow using differential pressure fluctuations. *International Journal on Multiphase Flow*, Vol. 10, N°6, p. 711-720.
- MEYER, Y. (1993). Wavelets: algorithms and applications, *SIAM*, Philadelphia, 133p.
- MI, Y.; ISHII, M.; TSOUKALAS, L. H. (1998). Vertical two-phase flow identification using advanced instrumentation and neural networks. *Nuclear Engineering and Design*, v. 184, p. 409-420.
- MILNE-THOMPSON, L.M. (1960). Theoretical Hydrodynamics. *The MacMillan Co.*, New York.
- MISHIMA, K.; ISHII, M. (1984). Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes. *Int. Journal on Heat and Mass Transfer*, v. 27, N°5, pp. 723-737.
- MOURA, C. H. W.; SAMPAIO, D. S.; LACERDA, I. M.; SELLI, M. F. (2004). Monitoring Leakages on oile production offloading at open seas using statistics associated with mass balance methods. *Procedings of International Pipeline Conference 2004*, Calgary, Alberta, Canada, Nro IPC04-0763, 5p.
- PRESS, W. H.; FLANNERY, B. P.; TEUKOLSKY, S.A.; VETTERLING, W. T. (1992). Numerical Recipes in C. *Cambridge University Press*, 966p.

-
- ROSENBLAT, F. (1958). The preceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, v.65, p.386-408.
- SAETHER, G.; BENDIKSEN, K.; MULLER, J.; FROLAND, E. (1990). The Fractal Statistics of Liquid Slug Lengths. *International Journal on Multiphase Flow*, Vol. 16, N°6, pp. 1117-1126.
- SEKOGUCHI, K.; INOUE, K.; IMASAKA, T. (1987). Void signal analysis and gas-liquid two-phase flow regime determination by a statistical pattern recognition method. *JSME International Journal*, Vol. 30, N°266, pp. 1266-1273.
- SELEGHIM JR., P.; HERVIEU, E. (1994). Caractérisation des changements de configuration des écoulements diphasiques gaz-liquide par analyse de la fréquence instantanée. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 319, Série II, p. 611-616.
- SELEGHIM JR., P. (1996). Caractérisation des changements de configuration d'un écoulement diphasique horizontal par l'application de méthodes d'analyse temps-fréquence. *PhD. Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble*, Spécialité : Mécanique.
- SELEGHIM JR., P.; HERVIEU, E.; SANTOS, A. M. (1998). Time-Frequency Characterisation of Two-Phase Horizontal Air-Water Flow Regimes. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*. Brasil: v.20, n.3, p.1 – 14.
- SELEGHIM JR. (2002). Criação de uma linha de pesquisa em instrumentação e controle de escoamentos multifásicos industriais. *Livre Docência em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo*, 133p.
- SILVA, H. V.; MOROOKA, C. K.; GUILHERME, I. R.; MENDES, J. R. P.; FONSECA, T. C. (2003). Leak detection using a fuzzy system. *Proceedings of COBEM 2003*, COBEM2003 – 0889, November 10-14, São Paulo.

-
- SILVA, R. A.; BUIATTI, C. M.; CRUZ, S. L.; PEREIRA, J. A. F. R. (1996). Pressure wave behaviour and leak detection in pipelines. *Computer chem. Engng.*, v.20, pp. 491-496.
- STEWART, R. W. (1967). Mechanics of the air-sea interface, boundary layers and turbulence. *Phys. Fluids*, v.10, p.547.
- TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. (1976). A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE Journal*, Vol. 22, N°1, pp. 47-55.
- TINDELL, B.; ZHANG, X. J. (2004). Liquid Pipeline Leak Detection: The Esso Experience. *Pipeline & Gas Journal*, February.
- TUTU, N. K. (1984). Pressure drop fluctuations and bubble-slug transition in a vertical two-phase air-water flow. *International Journal on Multiphase Flow*, Vol. 10, N°2, pp.211-216.
- VINCE, M.A.; LAHEY, R.T. JR. (1982). On the development of an objective flow regime indicator. *International Journal on Multiphase Flow*, Vol. 8, N°2, pp. 93-124.
- WEISMAN, J.; DUNCAN, D.; GIBSON, J.; CRAWFORD, T. (1979). Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines. *International Journal on Multiphase Flow*, Vol. 5, pp. 437-462.
- WU, H.; ZHOU, F.; WU, Y. (2001). Intelligent identification system of flow regime of oil-gas-water multiphase flow. *International Journal on Multiphase Flow*, Vol. 27, pp.459-475.
- XIE, T; GHIAASIAAN, SM; KARRILA, S. (2004). Artificial neural network approach for flow regime classification in gas-liquid-fiber flows based on frequency domain analysis of pressure signals. *CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE* 59 (11): 2241-2251 JUN.

- YAN, H.; LIU, Y. H.; LIU, C. T. (2004). Identification of flow regimes using back-propagation networks trained on simulated data based on a capacitance tomography sensor. *Measurement Science and Technology*. Vol.15, pp. 432–436.
- ZHANG, X. J. (1993). Statistical Leak Detection in Gas and Liquid Pipelines. *Pipes & Pipelines International*, July-August: 26-29 pp.
- ZHANG, X. J. (1997). Designing a Cost-effective and Reliable Pipeline Leak Detection System. *Pipes & Pipelines International*, January-February, pp 20-26.
- ZHANG X. J. (1999). Real Time Pipeline Leak Detection on Shell's North Western Ethylene Pipeline. *IMechE*, pp. 69-77.

APÊNDICE A – Programas C para cálculos das transições Taitel & Dukler : métodos e variáveis definidos na seção 2.1.2

A.1 Transição entre padrão estratificado liso e intermitente

```

/*      RESOLUCAO DE TAITEL & DUKLER
        TRANSIÇÃO ESTRATIFICADO - INTERMITENTE */

#include "stdio.h"
#include "math.h"
#include "string.h"
#include "zbrent.c"
#define pi 3.14159265359
#define Ro_gas 1.179
#define Ro_liq 995.3
#define Nu_gas 1.57e-5
#define Nu_liq 7.32e-7
#define Sgm 7.20e-2
#define g 9.8
#define D 0.021
#define A (3.141592654*D*D)/4
#define Beta 0
#define Epsilon 1e-4 /* usado na derivada de dentro de F em Fi2 */
#define zbrent_tol 1e-5
#define LL 1e-2
#define HL 40.35
#define step 0.05

/***** VARIÁVEIS GLOBAIS DO MÓDULO *****/
float Ugs, Uls;
float h_til, Cg,m, Cl,n;
float Al_til, Ag_til, Sg_til, Sl_til;
/*usados em Fil */
float Ul_til,Ug_til, Dl_til, Dg_til, Si_til;
float wsa, dadht;

/*****
float Al_til_(float ht) /* ht = h_til */
{ return( 0.25*(pi- acos(2*ht-1)+ (2*ht-1)*sqrt(1-pow((2*ht-1), 2)) ) ); }

*****/
void set_h_til(float h_til)
{
    wsa = 2*h_til-1;
    dadht= sqrt(1- wsa*wsa);

    Al_til = (pi- acos(wsa)+ wsa*dadht )/4;
    Ag_til = pi/4- Al_til;
    Sl_til = pi- acos(wsa);
    Sg_til = pi- Sl_til;
    Si_til = dadht;
    wsa = wsa*sqrt(1-wsa*wsa)/ (pi-acos(wsa));
    Dl_til = 1+wsa;
    Dg_til = 4* Ag_til/ (Sg_til+ Si_til);
    Ug_til = pi/4/Ag_til;
    Ul_til = pi/4/Al_til;
}

*****/
float Fi2( float h )
{
    set_h_til(h);
    return( Ro_gas/(Ro_liq-Ro_gas)/D/g/cos(Beta)*Ugs*Ugs/(1-h)/(1-
h)*Ug_til*Ug_til/Ag_til*dadht -1 );
}

*****/
float Fi2 = INSTABILIDADE DE KELVIN HELMHOLTZ *****/
float Fil(float Uls)
{
    float x_quad, y, FilA, FilB;

```

```

x_quad = (4*Cl/D)* pow((Uls*D/Nu_liq), -n)* (Ro_liq* pow(Uls,2)/2) ;
x_quad = x_quad/ ( (4*Cg/D)* pow((Ugs*D/Nu_gas), -m)* (Ro_gas* pow(Ugs,2)/2) );
y = (Ro_liq-Ro_gas)* g* sin(Beta);
y = y/ ( (4*Cg/D) * pow( Ugs*D/Nu_gas, -m) * (Ro_gas* pow(Ugs, 2)/ 2) );

FilA = pow( Ul_til* Dl_til, -n)* pow( Ul_til, 2 )* ( Sl_til/Al_til*(h_til) );
FilB = pow( Ug_til* Dg_til, -m)* pow( Ug_til, 2 )* ((Sg_til/Ag_til)+
(Si_til/Al_til*(h_til))+ (Si_til/Ag_til) );
return( x_quad*FilA - FilB - 4*y );
}

/*****/
float Reynolds( float A_til, float S_til, float d, float Us, float Nu)
{
    return( (4* A_til* d* Us) / (S_til* Nu) );
}

/*****/
int main(void) *****/
int main(void)
{
    float Reg, Rel;
    Ugs = LL;
    while( Ugs < HL )
    {
        /* Obtem h_til com Fi2 */
        Cg=Cl=0.045; m=n=0.2;
        h_til = zbrent( Fi2, 0.0, 0.99, zbrent_tol);
        set_h_til(h_til);

        if( (Reg=Ugs*Ug_til*D*Dg_til/Nu_gas) > 1500)
        {
            Cg= 0.045; m=0.2;
            h_til = zbrent( Fi2, 0.0, 0.99, zbrent_tol);
            set_h_til(h_til);
        }
        else {
            Cg= 16; m=1;
            h_til = zbrent( Fi2, 0.0, 0.99, zbrent_tol);
            set_h_til(h_til);
        }

        Cl= 16; n=1;
        Uls = zbrent( Fil, 0.00001, 100, zbrent_tol );
        if( (Rel=Ul_til*Uls*Dl_til*D/Nu_liq) > 1500 )
        {
            Cl= 0.045; n= 0.2;
            Uls = zbrent( Fil, 0.00001, 100, zbrent_tol );
        }

        printf("%f %f\n", Ugs, Uls, Reg, Rel);
        Ugs = Ugs + step;
    }
}

```

A.2 Transição entre padrão estratificado liso e anular

```

/*      RESOLUCAO DE TAITEL & DUKLER      */

#include "stdio.h"
#include "math.h"
#include "string.h"
#include "zbrent.c"
#define pi 3.14159265359
#define Ro_gas 1.179
#define Ro_liq 995.3
#define Nu_gas 1.57e-5
#define Nu_liq 7.32e-7
#define Sgm 7.20e-2
#define g 9.8
#define D 0.021
#define A (3.141592654*D*D)/4
#define Beta 0
#define Epsilon 1e-4 /* usado na derivada de dentro de F em Fi2 */
#define zbrent_tol 1e-5

#define LL 1e-2
#define HL 1e+2
#define step 0.05

/***** VARIAVEIS GLOBAIS DO MODULO *****/
float Ugs, Uls;
float h_til, Cg,m, Cl,n;
float Al_til, Ag_til, Sg_til, Sl_til;
/*usados em Fil */
float Ul_til,Ug_til, Dl_til, Dg_til, Si_til;
float wsa, dadht;

/*****
void set_h_til(float h_til)
{
    wsa = 2*h_til-1;
    dadht= sqrt(1- wsa*wsa);

    Al_til = (pi- acos(wsa)+ wsa*dadht )/4;
    Ag_til = pi/4- Al_til;
    Sl_til = pi- acos(wsa);
    Sg_til = pi- Sl_til;
    Si_til = dadht;
    wsa = wsa*sqrt(1-wsa*wsa)/ (pi-acos(wsa));
    Dl_til = 1+wsa;
    Dg_til = 4* Ag_til/ (Sg_til+ Si_til);
    Ug_til = pi/4/Ag_til;
    Ul_til = pi/4/Al_til;
}

/*****
float Fi2_estrela( float Ugs )
{
    float h = h_til;
    return( Ro_gas/(Ro_liq-Ro_gas)/D/g/cos(Beta)*Ugs*Ugs/(1-h)/(1-
h)*Ug_til*Ug_til/Ag_til*dadht -1 );
}

/*****
float Fil(float Uls)
{
    float x_quad, y, Fil_1, Fil_2;
    x_quad = (4*Cl/D)* pow((Uls*D/Nu_liq), -n)* (Ro_liq* pow(Uls,2)/2) ;
    x_quad = x_quad/ ( (4*Cg/D)* pow((Ugs*D/Nu_gas), -m)* (Ro_gas* pow(Ugs,2)/2) );

    y = ((Ro_liq-Ro_gas)* g* sin(Beta));
    y = y/ ( (4*Cg/D) * pow((Ugs*D/Nu_gas), -m) * (Ro_gas*pow(Ugs,2)/ 2) );

    Fil_1 = pow((Ul_til*Dl_til),-n)* pow(Ul_til,2)* (Sl_til/Al_til);
    Fil_2 = pow((Ug_til*Dg_til),-m)* pow(Ug_til,2)* ((Sg_til/Ag_til)+
(Si_til/Al_til)+ (Si_til/Ag_til) );

    return( x_quad*Fil_1 - Fil_2 - 4*y );
}

```

```

/***** int main(void) *****/
int main(void)
{
float Reg,Rel, Ugs_linha;

/* Obtem h_til com Fi2 */
h_til = 0.5;
set_h_til(h_til);
Ugs_linha = zbrent( Fi2_estrela, 0.0001, 100, zbrent_tol);

Ugs = Ugs_linha;
while( Ugs < HL )
{
    if( (Reg=Ugs*Ug_til*D*Dg_til/Nu_gas) > 1500)
        { Cg=0.045; m=0.2;}
        else { Cg=16; m=1;}

    Cl= 0.045; n=0.2;
    Uls = zbrent( Fil, 0.00001, 100, zbrent_tol );

    if( (Rel=Ul_til*Uls*Dl_til*D/Nu_liq) < 1500 )
    {
        Cl= 16; n= 1;
        Uls = zbrent( Fil, 0.00001, 100, zbrent_tol );
    }

    printf("%f %f \n", Ugs, Uls);
    Ugs = Ugs + step;
}
}

```

A.3 Transição entre padrão estratificado liso e ondulado

```

#include "stdio.h"
#include "math.h"
#include "string.h"
#include "zbrent.c"
#define pi 3.14159265359
#define Ro_gas 1.179
#define Ro_liq 995.3
#define Nu_gas 1.57e-5
#define Nu_liq 7.32e-7
#define Sgm 7.20e-2
#define S 1e-2
#define g 9.8
#define D 0.021
#define A (3.141592654*D*D)/4
#define Beta 0
#define Epsilon 1e-4 /* usado na derivada de dentro de F em Fi2 */
#define zbrent_tol 1e-5
#define LL 1e-2
#define HL 10.96
#define step 0.05

/***** VARIAVEIS GLOBAIS DO MODULO *****/
float Ugs, Uls;
float h_til, Cg,m, Cl,n;
float Al_til, Ag_til, Sg_til, Sl_til;

/*usados em Fil */
float Ul_til,Ug_til, Dl_til, Dg_til, Si_til;
float wsa, dadht;

/*****
void set_h_til(float h_til)
{
    wsa = 2*h_til-1;
    dadht= sqrt(1- wsa*wsa);

    Al_til = (pi- acos(wsa)+ wsa*dadht )/4;
    Ag_til = pi/4- Al_til;
    Sl_til = pi- acos(wsa);
    Sg_til = pi- Sl_til;
    Si_til = dadht;
    wsa = wsa*sqrt(1-wsa*wsa)/ (pi-acos(wsa));
    Dl_til = 1+wsa;
    Dg_til = 4* Ag_til/ (Sg_til+ Si_til);
    Ug_til = pi/4/Ag_til;
    Ul_til = pi/4/Al_til;
}

/***** Fi2 = INSTABILIDADE DE KELVIN HELMHOLTZ *****/
float Fil(float Uls)
{
    float x_quad, y, Fil_1, Fil_2;
    x_quad = (4*Cl/D)* pow((Uls*D/Nu_liq), -n)* (Ro_liq* pow(Uls,2)/2) ;
    x_quad = x_quad/ ( (4*Cg/D)* pow((Ugs*D/Nu_gas), -m)* (Ro_gas* pow(Ugs,2)/2) );

    y = ((Ro_liq-Ro_gas)* g* sin(Beta));
    y = y/ ( (4*Cg/D) * pow((Ugs*D/Nu_gas), -m) * (Ro_gas*pow(Ugs,2)/ 2) );

    Fil_1 = pow((Ul_til*Dl_til),-n)* pow(Ul_til,2)* (Sl_til/Al_til);
    Fil_2 = pow((Ug_til*Dg_til),-m)* pow(Ug_til,2)* ((Sg_til/Ag_til)+
    (Si_til/Al_til)+ (Si_til/Ag_til) );

    return( x_quad*Fil_1 - Fil_2 - 4*y );
}

/*****
float FiC( float h_til )
{
    float A_aux, B_aux, y, Uls, Uls_aux1, Uls_aux2, FiC_aux;

    set_h_til(h_til);

    y = ((Ro_liq-Ro_gas)* g* sin(Beta));

```

```

        y = y/ ( (4*Cg/D) * pow((Ugs*D/Nu_gas), -m) * (Ro_gas*pow(Ugs,2)/ 2) );

        A_aux = pow((Ul_til*Dl_til),-n)* pow(Ul_til,2)* (Sl_til/Al_til);
        B_aux = pow((Ug_til*Dg_til),-m)* pow(Ug_til,2)* ((Sg_til/Ag_til)+
        (Si_til/Al_til)+ (Si_til/Ag_til) );

        Uls_aux1 = Cg* pow(Ugs*D/Nu_gas, -m)* Ro_gas * pow(Ugs,2);
        Uls_aux2 = Cl* pow( D/Nu_liq, -n)* Ro_liq;

        Uls = pow( (Uls_aux1/Uls_aux2)* ( (B_aux+4*y)/A_aux ), 1/(2-n) );

        FiC_aux = ( (Ro_gas*pow(Ugs,2) ) * Uls) / ( (Ro_liq-Ro_gas)* g* cos(Beta)* Nu_liq
        ) - pow( 2/ (Ug_til*sqrt(Ul_til*S)), 2) ;

        return( FiC_aux );
    }

/***** int main(void) *****/
int main(void)
{
    float Uls, Reg, Rel;
    Ugs = LL;
    Cg=Cl=16; m=n=1;

    while( Ugs < HL )
    {
        Cg=Cl=16; m=n=1;

        /* Obtem h_til com FiC */
        h_til = zbrent( FiC, 0.00001, 0.99, zbrent_tol);
        set_h_til(h_til);

        if( (Reg=Ugs*Ug_til*D*Dg_til/Nu_gas) > 1500)
        {
            Cg=0.045; m=0.2;
            h_til = zbrent( FiC, 0.00001, 0.99, zbrent_tol);
            set_h_til(h_til);
        }

        Cl = 16; n=1;
        Uls = zbrent( Fil, 0.00001, 100, zbrent_tol );
        if( (Rel=Ul_til*Uls*Dl_til*D/Nu_liq) > 1500 )
        {
            Cl= 0.045; n= 0.2;
            Uls = zbrent( Fil, 0.00001, 100, zbrent_tol );
        }

        printf("%f %f \n", Ugs, Uls);
        Ugs = Ugs + step;
    }
}

```

A.4 Transição entre padrão intermitente e a bolhas

```

/*      RESOLUCAO DE TAITEL & DUKLER      */

#include "stdio.h"
#include "math.h"
#include "string.h"
#include "zbrent.c"
#define pi 3.14159265359
#define Ro_gas 1.179
#define Ro_liq 995.3
#define Nu_gas 1.57e-5
#define Nu_liq 7.32e-7
#define Sgm 7.20e-2
#define g 9.8
#define D 0.021
#define A (3.141592654*D*D)/4
#define Beta 0
#define Epsilon 1e-4 /* usado na derivada de dentro de F em Fi2 */
#define zbrent_tol 1e-5
#define LL 1e-2
#define HL 1e+2
#define step 0.05

/***** VARIAVEIS GLOBAIS DO MODULO *****/
float Ugs, Uls;
float h_til, Cg,m, Cl,n;
float Al_til, Ag_til, Sg_til, Sl_til;

/*usados em Fil */
float Ul_til,Ug_til, Dl_til, Dg_til, Si_til;

float wsa, dadht;

/*****
void set_h_til(float h_til)
{
    wsa = 2*h_til-1;
    dadht= sqrt(1- wsa*wsa);

    Al_til = (pi- acos(wsa)+ wsa*dadht )/4;
    Ag_til = pi/4- Al_til;
    Sl_til = pi- acos(wsa);
    Sg_til = pi- Sl_til;
    Si_til = dadht;
    wsa = wsa*sqrt(1-wsa*wsa)/ (pi-acos(wsa));
    Dl_til = 1+wsa;
    Dg_til = 4* Ag_til/ (Sg_til+ Si_til);
    Ug_til = pi/4/Ag_til;
    Ul_til = pi/4/Al_til;
}

/*****
float Fil(float Uls)
{
    float x_quad, y, Fil_1, Fil_2;
    x_quad = (4*Cl/D)* pow((Uls*D/Nu_liq), -n)* (Ro_liq* pow(Uls,2)/2) ;
    x_quad = x_quad/ ( (4*Cg/D)* pow((Ugs*D/Nu_gas), -m)* (Ro_gas* pow(Ugs,2)/2) );

    y = ((Ro_liq-Ro_gas)* g* sin(Beta));
    y = y/ ( (4*Cg/D) * pow((Ugs*D/Nu_gas), -m) * (Ro_gas*pow(Ugs,2)/ 2) );

    Fil_1 = pow((Ul_til*Dl_til),-n)* pow(Ul_til,2)* (Sl_til/Al_til);
    Fil_2 = pow((Ug_til*Dg_til),-m)* pow(Ug_til,2)* ((Sg_til/Ag_til)+
(Si_til/Al_til)+ (Si_til/Ag_til) );

    return( x_quad*Fil_1 - Fil_2 - 4*y );
}

/*****
float FiD( float h_til )
{
    float a, b, c, d;
    float A_aux, B_aux, y, Uls, Uls_aux1, Uls_aux2;

```

```

    set_h_til(h_til);

    y = ((Ro_liq-Ro_gas)* g* sin(Beta));
    y = y/ ( (4*Cg/D) * pow((Ugs*D/Nu_gas), -m) * (Ro_gas*pow(Ugs,2)/ 2) );
    A_aux = pow((Ul_til*Dl_til),-n)* pow(Ul_til,2)* (Sl_til/Al_til);
    B_aux = pow((Ug_til*Dg_til),-m)* pow(Ug_til,2)* ((Sg_til/Ag_til)+
(Si_til/Al_til)+ (Si_til/Ag_til) );
    Uls_aux1 = Cg* pow(Ugs*D/Nu_gas, -m)* Ro_gas * pow(Ugs,2);
    Uls_aux2 = Cl* pow( D/Nu_liq, -n)* Ro_liq;
    Uls = pow( (Uls_aux1/Uls_aux2)* ( (B_aux+4*y)/A_aux ), 1/(2-n) );

    a= (4*Cl/D)* pow(Uls*D/Nu_liq, -n) * Ro_liq* pow(Uls,2)/2;
    b= g*(Ro_liq-Ro_gas)* cos(Beta);
    c= 8* Ag_til;
    d= Si_til* pow(Ul_til, 2)* pow(Ul_til*Dl_til, -n);
    return( (b*c)/(a*d) -1 );
}

/***** int main(void) *****/
int main(void)
{
    float Reg,Rel;

    Cl=Cg=16; m=n=1;
    Ugs= LL;
    while( Ugs < HL )
    {
        h_til = zbrent( FiD, 0.0001, 0.9999, zbrent_tol);
        set_h_til(h_til);

        if( (Reg=Ugs*Ug_til*D*Dg_til/Nu_gas) > 1500)
            { Cg=0.045; m=0.2; }

        Uls = zbrent( Fil, 0.00001, 100, zbrent_tol );

        if( (Rel=Ul_til*Uls*Dl_til*D/Nu_liq) > 1500 )
        {
            Cl= 0.045; n= 0.2;
            Uls = zbrent( Fil, 0.00001, 100, zbrent_tol );
        }

        printf("%f %f \n", Ugs, Uls);
        Ugs = Ugs + step;
    }
}

```

APÊNDICE B – Transições entre padrões de escoamento por Taitel & Dukler

B.1 Transição entre padrão estratificado e intermitente- Pares de velocidades superficiais do escoamento gás-líquido (U_{GS} , U_{LS}) em m/s, na tubulação de 30 mm de diâmetro interno do NETeF:

0.010 0.213	5.910 0.076	11.810 0.026	17.710 0.006
0.110 0.166	6.010 0.075	11.910 0.025	17.810 0.006
0.210 0.151	6.110 0.073	12.010 0.024	17.910 0.005
0.310 0.142	6.210 0.072	12.110 0.024	18.010 0.005
0.410 0.134	6.310 0.071	12.210 0.023	18.110 0.005
0.510 0.128	6.410 0.070	12.310 0.023	18.210 0.005
0.610 0.123	6.510 0.069	12.410 0.022	18.310 0.005
0.710 0.119	6.610 0.068	12.510 0.022	18.410 0.004
0.810 0.113	6.710 0.067	12.610 0.021	18.510 0.004
0.910 0.114	6.810 0.066	12.710 0.021	18.610 0.004
1.010 0.115	6.910 0.065	12.810 0.020	18.710 0.004
1.110 0.116	7.010 0.064	12.910 0.020	18.810 0.004
1.210 0.116	7.110 0.063	13.010 0.019	18.910 0.004
1.310 0.117	7.210 0.062	13.110 0.019	19.010 0.004
1.410 0.117	7.310 0.061	13.210 0.019	19.110 0.003
1.510 0.117	7.410 0.060	13.310 0.018	19.210 0.003
1.610 0.116	7.510 0.059	13.410 0.018	19.310 0.003
1.710 0.116	7.610 0.058	13.510 0.017	19.410 0.003
1.810 0.116	7.710 0.057	13.610 0.017	19.510 0.003
1.910 0.115	7.810 0.056	13.710 0.017	19.610 0.003
2.010 0.115	7.910 0.055	13.810 0.016	19.710 0.003
2.110 0.114	8.010 0.054	13.910 0.016	19.810 0.003
2.210 0.114	8.110 0.053	14.010 0.015	19.910 0.003
2.310 0.113	8.210 0.052	14.110 0.015	20.010 0.002
2.410 0.112	8.310 0.051	14.210 0.015	20.110 0.002
2.510 0.111	8.410 0.051	14.310 0.014	20.210 0.002
2.610 0.110	8.510 0.050	14.410 0.014	20.310 0.002
2.710 0.110	8.610 0.049	14.510 0.014	20.410 0.002
2.810 0.109	8.710 0.048	14.610 0.013	20.510 0.002
2.910 0.108	8.810 0.047	14.710 0.013	20.610 0.002
3.010 0.107	8.910 0.046	14.810 0.013	20.710 0.002
3.110 0.106	9.010 0.045	14.910 0.012	20.810 0.002
3.210 0.105	9.110 0.044	15.010 0.012	20.910 0.002
3.310 0.104	9.210 0.044	15.110 0.012	21.010 0.002
3.410 0.103	9.310 0.043	15.210 0.011	21.110 0.002
3.510 0.102	9.410 0.042	15.310 0.011	21.210 0.002
3.610 0.101	9.510 0.041	15.410 0.011	21.310 0.002
3.710 0.100	9.610 0.040	15.510 0.011	21.410 0.002
3.810 0.099	9.710 0.040	15.610 0.010	21.510 0.001
3.910 0.098	9.810 0.039	15.710 0.010	21.610 0.001
4.010 0.097	9.910 0.038	15.810 0.010	21.710 0.001
4.110 0.095	10.010 0.037	15.910 0.010	21.810 0.001
4.210 0.094	10.110 0.037	16.010 0.009	21.910 0.001
4.310 0.093	10.210 0.036	16.110 0.009	22.010 0.001
4.410 0.092	10.310 0.035	16.210 0.009	22.110 0.001
4.510 0.091	10.410 0.034	16.310 0.009	22.210 0.001
4.610 0.090	10.510 0.034	16.410 0.009	22.310 0.001
4.710 0.089	10.610 0.033	16.510 0.008	22.410 0.001
4.810 0.088	10.710 0.032	16.610 0.008	22.510 0.001
4.910 0.087	10.810 0.032	16.710 0.008	22.610 0.001
5.010 0.086	10.910 0.031	16.810 0.008	22.710 0.001
5.110 0.084	11.010 0.030	16.910 0.008	22.810 0.001
5.210 0.083	11.110 0.030	17.010 0.007	22.910 0.001
5.310 0.082	11.210 0.029	17.110 0.007	23.010 0.001
5.410 0.081	11.310 0.029	17.210 0.007	23.110 0.001
5.510 0.080	11.410 0.028	17.310 0.007	23.210 0.001
5.610 0.079	11.510 0.027	17.410 0.006	23.310 0.001
5.710 0.078	11.610 0.027	17.510 0.006	23.410 0.001
5.810 0.077	11.710 0.026	17.610 0.006	23.510 0.001

23.610 0.001	27.810 0.000	32.010 0.000	36.210 0.000
23.710 0.001	27.910 0.000	32.110 0.000	36.310 0.000
23.810 0.001	28.010 0.000	32.210 0.000	36.410 0.000
23.910 0.001	28.110 0.000	32.310 0.000	36.510 0.000
24.010 0.001	28.210 0.000	32.410 0.000	36.610 0.000
24.110 0.001	28.310 0.000	32.510 0.000	36.710 0.000
24.210 0.001	28.410 0.000	32.610 0.000	36.810 0.000
24.310 0.001	28.510 0.000	32.710 0.000	36.910 0.000
24.410 0.001	28.610 0.000	32.810 0.000	37.010 0.000
24.510 0.001	28.710 0.000	32.910 0.000	37.110 0.000
24.610 0.001	28.810 0.000	33.010 0.000	37.210 0.000
24.710 0.001	28.910 0.000	33.110 0.000	37.310 0.000
24.810 0.000	29.010 0.000	33.210 0.000	37.410 0.000
24.910 0.000	29.110 0.000	33.310 0.000	37.510 0.000
25.010 0.000	29.210 0.000	33.410 0.000	37.610 0.000
25.110 0.000	29.310 0.000	33.510 0.000	37.710 0.000
25.210 0.000	29.410 0.000	33.610 0.000	37.810 0.000
25.310 0.000	29.510 0.000	33.710 0.000	37.910 0.000
25.410 0.000	29.610 0.000	33.810 0.000	38.010 0.000
25.510 0.000	29.710 0.000	33.910 0.000	38.110 0.000
25.610 0.000	29.810 0.000	34.010 0.000	38.210 0.000
25.710 0.000	29.910 0.000	34.110 0.000	38.310 0.000
25.810 0.000	30.010 0.000	34.210 0.000	38.410 0.000
25.910 0.000	30.110 0.000	34.310 0.000	38.510 0.000
26.010 0.000	30.210 0.000	34.410 0.000	38.610 0.000
26.110 0.000	30.310 0.000	34.510 0.000	38.710 0.000
26.210 0.000	30.410 0.000	34.610 0.000	38.810 0.000
26.310 0.000	30.510 0.000	34.710 0.000	38.910 0.000
26.410 0.000	30.610 0.000	34.810 0.000	39.010 0.000
26.510 0.000	30.710 0.000	34.910 0.000	39.110 0.000
26.610 0.000	30.810 0.000	35.010 0.000	39.210 0.000
26.710 0.000	30.910 0.000	35.110 0.000	39.310 0.000
26.810 0.000	31.010 0.000	35.210 0.000	39.410 0.000
26.910 0.000	31.110 0.000	35.310 0.000	39.510 0.000
27.010 0.000	31.210 0.000	35.410 0.000	39.610 0.000
27.110 0.000	31.310 0.000	35.510 0.000	39.710 0.000
27.210 0.000	31.410 0.000	35.610 0.000	39.810 0.000
27.310 0.000	31.510 0.000	35.710 0.000	39.910 0.000
27.410 0.000	31.610 0.000	35.810 0.000	40.010 0.000
27.510 0.000	31.710 0.000	35.910 0.000	40.110 0.000
27.610 0.000	31.810 0.000	36.010 0.000	40.210 0.000
27.710 0.000	31.910 0.000	36.110 0.000	40.310 0.000

B.2 Transição entre padrão intermitente e anular - Pares de velocidades superficiais do escoamento gás-líquido (U_{GS} , U_{LS}) em m/s, na tubulação de 30 mm de diâmetro interno do NETeF:

0.010 0.213	6.710 0.067	13.410 0.018	20.110 0.002
0.110 0.166	6.810 0.066	13.510 0.017	20.210 0.002
0.210 0.151	6.910 0.065	13.610 0.017	20.310 0.002
0.310 0.142	7.010 0.064	13.710 0.017	20.410 0.002
0.410 0.134	7.110 0.063	13.810 0.016	20.510 0.002
0.510 0.128	7.210 0.062	13.910 0.016	20.610 0.002
0.610 0.123	7.310 0.061	14.010 0.015	20.710 0.002
0.710 0.119	7.410 0.060	14.110 0.015	20.810 0.002
0.810 0.113	7.510 0.059	14.210 0.015	20.910 0.002
0.910 0.114	7.610 0.058	14.310 0.014	21.010 0.002
1.010 0.115	7.710 0.057	14.410 0.014	21.110 0.002
1.110 0.116	7.810 0.056	14.510 0.014	21.210 0.002
1.210 0.116	7.910 0.055	14.610 0.013	21.310 0.002
1.310 0.117	8.010 0.054	14.710 0.013	21.410 0.002
1.410 0.117	8.110 0.053	14.810 0.013	21.510 0.001
1.510 0.117	8.210 0.052	14.910 0.012	21.610 0.001
1.610 0.116	8.310 0.051	15.010 0.012	21.710 0.001
1.710 0.116	8.410 0.051	15.110 0.012	21.810 0.001
1.810 0.116	8.510 0.050	15.210 0.011	21.910 0.001
1.910 0.115	8.610 0.049	15.310 0.011	22.010 0.001
2.010 0.115	8.710 0.048	15.410 0.011	22.110 0.001
2.110 0.114	8.810 0.047	15.510 0.011	22.210 0.001
2.210 0.114	8.910 0.046	15.610 0.010	22.310 0.001
2.310 0.113	9.010 0.045	15.710 0.010	22.410 0.001
2.410 0.112	9.110 0.044	15.810 0.010	22.510 0.001
2.510 0.111	9.210 0.044	15.910 0.010	22.610 0.001
2.610 0.110	9.310 0.043	16.010 0.009	22.710 0.001
2.710 0.110	9.410 0.042	16.110 0.009	22.810 0.001
2.810 0.109	9.510 0.041	16.210 0.009	22.910 0.001
2.910 0.108	9.610 0.040	16.310 0.009	23.010 0.001
3.010 0.107	9.710 0.040	16.410 0.009	23.110 0.001
3.110 0.106	9.810 0.039	16.510 0.008	23.210 0.001
3.210 0.105	9.910 0.038	16.610 0.008	23.310 0.001
3.310 0.104	10.010 0.037	16.710 0.008	23.410 0.001
3.410 0.103	10.110 0.037	16.810 0.008	23.510 0.001
3.510 0.102	10.210 0.036	16.910 0.008	23.610 0.001
3.610 0.101	10.310 0.035	17.010 0.007	23.710 0.001
3.710 0.100	10.410 0.034	17.110 0.007	23.810 0.001
3.810 0.099	10.510 0.034	17.210 0.007	23.910 0.001
3.910 0.098	10.610 0.033	17.310 0.007	24.010 0.001
4.010 0.097	10.710 0.032	17.410 0.006	24.110 0.001
4.110 0.095	10.810 0.032	17.510 0.006	24.210 0.001
4.210 0.094	10.910 0.031	17.610 0.006	24.310 0.001
4.310 0.093	11.010 0.030	17.710 0.006	24.410 0.001
4.410 0.092	11.110 0.030	17.810 0.006	24.510 0.001
4.510 0.091	11.210 0.029	17.910 0.005	24.610 0.001
4.610 0.090	11.310 0.029	18.010 0.005	24.710 0.001
4.710 0.089	11.410 0.028	18.110 0.005	24.810 0.000
4.810 0.088	11.510 0.027	18.210 0.005	24.910 0.000
4.910 0.087	11.610 0.027	18.310 0.005	25.010 0.000
5.010 0.086	11.710 0.026	18.410 0.004	25.110 0.000
5.110 0.084	11.810 0.026	18.510 0.004	25.210 0.000
5.210 0.083	11.910 0.025	18.610 0.004	25.310 0.000
5.310 0.082	12.010 0.024	18.710 0.004	25.410 0.000
5.410 0.081	12.110 0.024	18.810 0.004	25.510 0.000
5.510 0.080	12.210 0.023	18.910 0.004	25.610 0.000
5.610 0.079	12.310 0.023	19.010 0.004	25.710 0.000
5.710 0.078	12.410 0.022	19.110 0.003	25.810 0.000
5.810 0.077	12.510 0.022	19.210 0.003	25.910 0.000
5.910 0.076	12.610 0.021	19.310 0.003	26.010 0.000
6.010 0.075	12.710 0.021	19.410 0.003	26.110 0.000
6.110 0.073	12.810 0.020	19.510 0.003	26.210 0.000
6.210 0.072	12.910 0.020	19.610 0.003	26.310 0.000
6.310 0.071	13.010 0.019	19.710 0.003	26.410 0.000
6.410 0.070	13.110 0.019	19.810 0.003	26.510 0.000
6.510 0.069	13.210 0.019	19.910 0.003	26.610 0.000
6.610 0.068	13.310 0.018	20.010 0.002	26.710 0.000

26.810 0.000	30.210 0.000	33.610 0.000	37.010 0.000
26.910 0.000	30.310 0.000	33.710 0.000	37.110 0.000
27.010 0.000	30.410 0.000	33.810 0.000	37.210 0.000
27.110 0.000	30.510 0.000	33.910 0.000	37.310 0.000
27.210 0.000	30.610 0.000	34.010 0.000	37.410 0.000
27.310 0.000	30.710 0.000	34.110 0.000	37.510 0.000
27.410 0.000	30.810 0.000	34.210 0.000	37.610 0.000
27.510 0.000	30.910 0.000	34.310 0.000	37.710 0.000
27.610 0.000	31.010 0.000	34.410 0.000	37.810 0.000
27.710 0.000	31.110 0.000	34.510 0.000	37.910 0.000
27.810 0.000	31.210 0.000	34.610 0.000	38.010 0.000
27.910 0.000	31.310 0.000	34.710 0.000	38.110 0.000
28.010 0.000	31.410 0.000	34.810 0.000	38.210 0.000
28.110 0.000	31.510 0.000	34.910 0.000	38.310 0.000
28.210 0.000	31.610 0.000	35.010 0.000	38.410 0.000
28.310 0.000	31.710 0.000	35.110 0.000	38.510 0.000
28.410 0.000	31.810 0.000	35.210 0.000	38.610 0.000
28.510 0.000	31.910 0.000	35.310 0.000	38.710 0.000
28.610 0.000	32.010 0.000	35.410 0.000	38.810 0.000
28.710 0.000	32.110 0.000	35.510 0.000	38.910 0.000
28.810 0.000	32.210 0.000	35.610 0.000	39.010 0.000
28.910 0.000	32.310 0.000	35.710 0.000	39.110 0.000
29.010 0.000	32.410 0.000	35.810 0.000	39.210 0.000
29.110 0.000	32.510 0.000	35.910 0.000	39.310 0.000
29.210 0.000	32.610 0.000	36.010 0.000	39.410 0.000
29.310 0.000	32.710 0.000	36.110 0.000	39.510 0.000
29.410 0.000	32.810 0.000	36.210 0.000	39.610 0.000
29.510 0.000	32.910 0.000	36.310 0.000	39.710 0.000
29.610 0.000	33.010 0.000	36.410 0.000	39.810 0.000
29.710 0.000	33.110 0.000	36.510 0.000	39.910 0.000
29.810 0.000	33.210 0.000	36.610 0.000	40.010 0.000
29.910 0.000	33.310 0.000	36.710 0.000	40.110 0.000
30.010 0.000	33.410 0.000	36.810 0.000	40.210 0.000
30.110 0.000	33.510 0.000	36.910 0.000	40.310 0.000

B.3 Transição entre padrão estratificado liso e ondulado- Pares de velocidades superficiais do escoamento gás-líquido (U_{GS} , U_{LS}) em m/s, na tubulação de 30 mm de diâmetro interno do NETeF:

0.010	0.687	5.510	0.002
0.110	0.284	5.610	0.001
0.210	0.217	5.710	0.001
0.310	0.181	5.810	0.001
0.410	0.158	5.910	0.001
0.510	0.140	6.010	0.001
0.610	0.127	6.110	0.001
0.710	0.116	6.210	0.001
0.810	0.106	6.310	0.001
0.910	0.099	6.410	0.001
1.010	0.092	6.510	0.000
1.110	0.087	6.610	0.000
1.210	0.081	6.710	0.000
1.310	0.076	6.810	0.000
1.410	0.071	6.910	0.000
1.510	0.067	7.010	0.000
1.610	0.063	7.110	0.000
1.710	0.059	7.210	0.000
1.810	0.055	7.310	0.000
1.910	0.051	7.410	0.000
2.010	0.048	7.510	0.000
2.110	0.045	7.610	0.000
2.210	0.042	7.710	0.000
2.310	0.039	7.810	0.000
2.410	0.037	7.910	0.000
2.510	0.034	8.010	0.000
2.610	0.032	8.110	0.000
2.710	0.030	8.210	0.000
2.810	0.028	8.310	0.000
2.910	0.026	8.410	0.000
3.010	0.024	8.510	0.000
3.110	0.022	8.610	0.000
3.210	0.020	8.710	0.000
3.310	0.019	8.810	0.000
3.410	0.017	8.910	0.000
3.510	0.016	9.010	0.000
3.610	0.015	9.110	0.000
3.710	0.014	9.210	0.000
3.810	0.012	9.310	0.000
3.910	0.011	9.410	0.000
4.010	0.010	9.510	0.000
4.110	0.009	9.610	0.000
4.210	0.008	9.710	0.000
4.310	0.007	9.810	0.000
4.410	0.006	9.910	0.000
4.510	0.005	10.010	0.000
4.610	0.005	10.110	0.000
4.710	0.004	10.210	0.000
4.810	0.004	10.310	0.000
4.910	0.003	10.410	0.000
5.010	0.003	10.510	0.000
5.110	0.002	10.610	0.000
5.210	0.002	10.710	0.000
5.310	0.002	10.810	0.000
5.410	0.002	10.910	0.000

B.4 Transição entre padrão intermitente e a bolhas - Pares de velocidades superficiais do escoamento gás-líquido (U_{GS} , U_{LS}) em m/s, na tubulação de 30 mm de diâmetro interno do NETeF:

0.010 1.719	6.510 4.496	13.010 4.899	19.510 5.070	26.010 5.143
0.110 2.313	6.610 4.506	13.110 4.903	19.610 5.072	26.110 5.144
0.210 2.504	6.710 4.516	13.210 4.907	19.710 5.074	26.210 5.144
0.310 2.625	6.810 4.525	13.310 4.911	19.810 5.075	26.310 5.145
0.410 2.850	6.910 4.534	13.410 4.914	19.910 5.077	26.410 5.146
0.510 2.862	7.010 4.543	13.510 4.918	20.010 5.079	26.510 5.146
0.610 2.964	7.110 4.552	13.610 4.921	20.110 5.080	26.610 5.147
0.710 3.053	7.210 4.561	13.710 4.925	20.210 5.082	26.710 5.147
0.810 3.132	7.310 4.570	13.810 4.928	20.310 5.083	26.810 5.148
0.910 3.203	7.410 4.578	13.910 4.932	20.410 5.085	26.910 5.148
1.010 3.267	7.510 4.587	14.010 4.935	20.510 5.086	27.010 5.149
1.110 3.326	7.610 4.595	14.110 4.939	20.610 5.088	27.110 5.149
1.210 3.381	7.710 4.603	14.210 4.942	20.710 5.089	27.210 5.150
1.310 3.431	7.810 4.611	14.310 4.945	20.810 5.091	27.310 5.150
1.410 3.479	7.910 4.619	14.410 4.948	20.910 5.092	27.410 5.151
1.510 3.523	8.010 4.626	14.510 4.952	21.010 5.094	27.510 5.151
1.610 3.565	8.110 4.634	14.610 4.955	21.110 5.095	27.610 5.152
1.710 3.604	8.210 4.642	14.710 4.958	21.210 5.096	27.710 5.152
1.810 3.641	8.310 4.649	14.810 4.961	21.310 5.098	27.810 5.153
1.910 3.677	8.410 4.656	14.910 4.964	21.410 5.099	27.910 5.153
2.010 3.711	8.510 4.663	15.010 4.967	21.510 5.100	28.010 5.154
2.110 3.743	8.610 4.670	15.110 4.970	21.610 5.102	28.110 5.154
2.210 3.774	8.710 4.677	15.210 4.973	21.710 5.103	28.210 5.154
2.310 3.804	8.810 4.684	15.310 4.976	21.810 5.104	28.310 5.155
2.410 3.832	8.910 4.691	15.410 4.979	21.910 5.105	28.410 5.155
2.510 3.859	9.010 4.697	15.510 4.982	22.010 5.107	28.510 5.155
2.610 3.886	9.110 4.704	15.610 4.984	22.110 5.108	28.610 5.156
2.710 3.911	9.210 4.710	15.710 4.987	22.210 5.109	28.710 5.156
2.810 3.936	9.310 4.717	15.810 4.990	22.310 5.110	28.810 5.156
2.910 3.959	9.410 4.723	15.910 4.992	22.410 5.111	28.910 5.157
3.010 3.982	9.510 4.729	16.010 4.995	22.510 5.113	29.010 5.157
3.110 4.004	9.610 4.735	16.110 4.998	22.610 5.114	29.110 5.157
3.210 4.026	9.710 4.741	16.210 5.000	22.710 5.115	29.210 5.158
3.310 4.046	9.810 4.747	16.310 5.003	22.810 5.116	29.310 5.158
3.410 4.066	9.910 4.753	16.410 5.006	22.910 5.117	29.410 5.158
3.510 4.086	10.010 4.759	16.510 5.008	23.010 5.118	29.510 5.158
3.610 4.105	10.110 4.764	16.610 5.010	23.110 5.119	29.610 5.159
3.710 4.123	10.210 4.770	16.710 5.013	23.210 5.120	29.710 5.159
3.810 4.141	10.310 4.775	16.810 5.015	23.310 5.121	29.810 5.159
3.910 4.159	10.410 4.781	16.910 5.018	23.410 5.122	29.910 5.159
4.010 4.176	10.510 4.786	17.010 5.020	23.510 5.123	30.010 5.160
4.110 4.192	10.610 4.791	17.110 5.022	23.610 5.124	30.110 5.160
4.210 4.209	10.710 4.797	17.210 5.025	23.710 5.125	30.210 5.160
4.310 4.224	10.810 4.802	17.310 5.027	23.810 5.126	30.310 5.160
4.410 4.240	10.910 4.807	17.410 5.029	23.910 5.127	30.410 5.160
4.510 4.255	11.010 4.812	17.510 5.031	24.010 5.128	30.510 5.161
4.610 4.270	11.110 4.817	17.610 5.034	24.110 5.129	30.610 5.161
4.710 4.284	11.210 4.822	17.710 5.036	24.210 5.130	30.710 5.161
4.810 4.298	11.310 4.826	17.810 5.038	24.310 5.131	30.810 5.161
4.910 4.312	11.410 4.831	17.910 5.040	24.410 5.131	30.910 5.161
5.010 4.325	11.510 4.836	18.010 5.042	24.510 5.132	31.010 5.161
5.110 4.338	11.610 4.841	18.110 5.044	24.610 5.133	31.110 5.161
5.210 4.351	11.710 4.845	18.210 5.046	24.710 5.134	31.210 5.162
5.310 4.363	11.810 4.850	18.310 5.048	24.810 5.135	31.310 5.162
5.410 4.376	11.910 4.854	18.410 5.050	24.910 5.135	31.410 5.162
5.510 4.388	12.010 4.858	18.510 5.052	25.010 5.136	31.510 5.162
5.610 4.400	12.110 4.863	18.610 5.054	25.110 5.137	31.610 5.162
5.710 4.411	12.210 4.867	18.710 5.056	25.210 5.138	31.710 5.162
5.810 4.423	12.310 4.871	18.810 5.058	25.310 5.138	31.810 5.162
5.910 4.434	12.410 4.875	18.910 5.060	25.410 5.139	31.910 5.162
6.010 4.445	12.510 4.879	19.010 5.062	25.510 5.140	32.010 5.162
6.110 4.455	12.610 4.884	19.110 5.063	25.610 5.141	32.110 5.162
6.210 4.466	12.710 4.888	19.210 5.065	25.710 5.141	32.210 5.162
6.310 4.476	12.810 4.891	19.310 5.067	25.810 5.142	32.310 5.162
6.410 4.486	12.910 4.895	19.410 5.069	25.910 5.143	32.410 5.162

32.510 5.162	40.110 5.143	47.710 5.094	55.310 5.027	62.910 4.945
32.610 5.162	40.210 5.142	47.810 5.093	55.410 5.026	63.010 4.944
32.710 5.162	40.310 5.142	47.910 5.093	55.510 5.025	63.110 4.943
32.810 5.162	40.410 5.141	48.010 5.092	55.610 5.024	63.210 4.942
32.910 5.162	40.510 5.141	48.110 5.091	55.710 5.023	63.310 4.941
33.010 5.162	40.610 5.140	48.210 5.090	55.810 5.022	63.410 4.940
33.110 5.162	40.710 5.140	48.310 5.089	55.910 5.021	63.510 4.939
33.210 5.162	40.810 5.139	48.410 5.089	56.010 5.020	63.610 4.937
33.310 5.162	40.910 5.139	48.510 5.088	56.110 5.019	63.710 4.936
33.410 5.162	41.010 5.138	48.610 5.087	56.210 5.018	63.810 4.935
33.510 5.162	41.110 5.138	48.710 5.086	56.310 5.017	63.910 4.934
33.610 5.162	41.210 5.137	48.810 5.085	56.410 5.016	64.010 4.933
33.710 5.162	41.310 5.137	48.910 5.085	56.510 5.015	64.110 4.932
33.810 5.161	41.410 5.136	49.010 5.084	56.610 5.013	64.210 4.931
33.910 5.161	41.510 5.136	49.110 5.083	56.710 5.012	64.310 4.929
34.010 5.161	41.610 5.135	49.210 5.082	56.810 5.011	64.410 4.928
34.110 5.161	41.710 5.134	49.310 5.081	56.910 5.010	64.510 4.927
34.210 5.161	41.810 5.134	49.410 5.081	57.010 5.009	64.610 4.926
34.310 5.161	41.910 5.133	49.510 5.080	57.110 5.008	64.710 4.925
34.410 5.161	42.010 5.133	49.610 5.079	57.210 5.007	64.810 4.924
34.510 5.161	42.110 5.132	49.710 5.078	57.310 5.006	64.910 4.922
34.610 5.160	42.210 5.132	49.810 5.077	57.410 5.005	65.010 4.921
34.710 5.160	42.310 5.131	49.910 5.076	57.510 5.004	65.110 4.920
34.810 5.160	42.410 5.131	50.010 5.075	57.610 5.003	65.210 4.919
34.910 5.160	42.510 5.130	50.110 5.075	57.710 5.002	65.310 4.918
35.010 5.160	42.610 5.129	50.210 5.074	57.810 5.001	65.410 4.916
35.110 5.160	42.710 5.129	50.310 5.073	57.910 5.000	65.510 4.915
35.210 5.159	42.810 5.128	50.410 5.072	58.010 4.999	65.610 4.914
35.310 5.159	42.910 5.128	50.510 5.071	58.110 4.998	65.710 4.913
35.410 5.159	43.010 5.127	50.610 5.070	58.210 4.997	65.810 4.912
35.510 5.159	43.110 5.126	50.710 5.069	58.310 4.996	65.910 4.911
35.610 5.159	43.210 5.126	50.810 5.069	58.410 4.995	66.010 4.909
35.710 5.158	43.310 5.125	50.910 5.068	58.510 4.994	66.110 4.908
35.810 5.158	43.410 5.125	51.010 5.067	58.610 4.993	66.210 4.907
35.910 5.158	43.510 5.124	51.110 5.066	58.710 4.992	66.310 4.906
36.010 5.158	43.610 5.123	51.210 5.065	58.810 4.991	66.410 4.905
36.110 5.157	43.710 5.123	51.310 5.064	58.910 4.990	66.510 4.904
36.210 5.157	43.810 5.122	51.410 5.063	59.010 4.989	66.610 4.902
36.310 5.157	43.910 5.121	51.510 5.062	59.110 4.987	66.710 4.901
36.410 5.157	44.010 5.121	51.610 5.061	59.210 4.986	66.810 4.900
36.510 5.156	44.110 5.120	51.710 5.061	59.310 4.985	66.910 4.899
36.610 5.156	44.210 5.119	51.810 5.060	59.410 4.984	67.010 4.898
36.710 5.156	44.310 5.119	51.910 5.059	59.510 4.983	67.110 4.896
36.810 5.155	44.410 5.118	52.010 5.058	59.610 4.982	67.210 4.895
36.910 5.155	44.510 5.117	52.110 5.057	59.710 4.981	67.310 4.894
37.010 5.155	44.610 5.117	52.210 5.056	59.810 4.980	67.410 4.893
37.110 5.155	44.710 5.116	52.310 5.055	59.910 4.979	67.510 4.892
37.210 5.154	44.810 5.115	52.410 5.054	60.010 4.978	67.610 4.890
37.310 5.154	44.910 5.115	52.510 5.053	60.110 4.977	67.710 4.889
37.410 5.154	45.010 5.114	52.610 5.052	60.210 4.976	67.810 4.888
37.510 5.153	45.110 5.113	52.710 5.051	60.310 4.974	67.910 4.887
37.610 5.153	45.210 5.113	52.810 5.051	60.410 4.973	68.010 4.885
37.710 5.153	45.310 5.112	52.910 5.050	60.510 4.972	68.110 4.884
37.810 5.152	45.410 5.111	53.010 5.049	60.610 4.971	68.210 4.883
37.910 5.152	45.510 5.111	53.110 5.048	60.710 4.970	68.310 4.882
38.010 5.151	45.610 5.110	53.210 5.047	60.810 4.969	68.410 4.881
38.110 5.151	45.710 5.109	53.310 5.046	60.910 4.968	68.510 4.879
38.210 5.151	45.810 5.109	53.410 5.045	61.010 4.967	68.610 4.878
38.310 5.150	45.910 5.108	53.510 5.044	61.110 4.966	68.710 4.877
38.410 5.150	46.010 5.107	53.610 5.043	61.210 4.965	68.810 4.876
38.510 5.150	46.110 5.106	53.710 5.042	61.310 4.963	68.910 4.875
38.610 5.149	46.210 5.106	53.810 5.041	61.410 4.962	69.010 4.873
38.710 5.149	46.310 5.105	53.910 5.040	61.510 4.961	69.110 4.872
38.810 5.148	46.410 5.104	54.010 5.039	61.610 4.960	69.210 4.871
38.910 5.148	46.510 5.103	54.110 5.038	61.710 4.959	69.310 4.870
39.010 5.148	46.610 5.103	54.210 5.037	61.810 4.958	69.410 4.868
39.110 5.147	46.710 5.102	54.310 5.036	61.910 4.957	69.510 4.867
39.210 5.147	46.810 5.101	54.410 5.035	62.010 4.956	69.610 4.866
39.310 5.146	46.910 5.100	54.510 5.034	62.110 4.954	69.710 4.865
39.410 5.146	47.010 5.100	54.610 5.033	62.210 4.953	69.810 4.863
39.510 5.145	47.110 5.099	54.710 5.032	62.310 4.952	69.910 4.862
39.610 5.145	47.210 5.098	54.810 5.031	62.410 4.951	70.010 4.861
39.710 5.145	47.310 5.097	54.910 5.030	62.510 4.950	70.110 4.860
39.810 5.144	47.410 5.097	55.010 5.030	62.610 4.949	70.210 4.859
39.910 5.144	47.510 5.096	55.110 5.029	62.710 4.948	70.310 4.857
40.010 5.143	47.610 5.095	55.210 5.028	62.810 4.947	70.410 4.856

70.509 4.855	76.409 4.780	82.309 4.701	88.209 4.620	94.109 4.538
70.609 4.854	76.509 4.778	82.409 4.700	88.309 4.619	94.209 4.536
70.709 4.852	76.609 4.777	82.509 4.698	88.409 4.618	94.309 4.535
70.809 4.851	76.709 4.776	82.609 4.697	88.509 4.616	94.409 4.533
70.909 4.850	76.809 4.774	82.709 4.696	88.609 4.615	94.509 4.532
71.009 4.849	76.909 4.773	82.809 4.694	88.709 4.613	94.609 4.531
71.109 4.847	77.009 4.772	82.909 4.693	88.809 4.612	94.709 4.529
71.209 4.846	77.109 4.770	83.009 4.692	88.909 4.611	94.809 4.528
71.309 4.845	77.209 4.769	83.109 4.690	89.009 4.609	94.909 4.526
71.409 4.844	77.309 4.768	83.209 4.689	89.109 4.608	95.009 4.525
71.509 4.842	77.409 4.766	83.309 4.688	89.209 4.606	95.109 4.523
71.609 4.841	77.509 4.765	83.409 4.686	89.309 4.605	95.209 4.522
71.709 4.840	77.609 4.764	83.509 4.685	89.409 4.604	95.309 4.521
71.809 4.839	77.709 4.763	83.609 4.684	89.509 4.602	95.409 4.519
71.909 4.837	77.809 4.761	83.709 4.682	89.609 4.601	95.509 4.518
72.009 4.836	77.909 4.760	83.809 4.681	89.709 4.599	95.609 4.516
72.109 4.835	78.009 4.759	83.909 4.679	89.809 4.598	95.709 4.515
72.209 4.833	78.109 4.757	84.009 4.678	89.909 4.597	95.809 4.514
72.309 4.832	78.209 4.756	84.109 4.677	90.009 4.595	95.909 4.512
72.409 4.831	78.309 4.755	84.209 4.675	90.109 4.594	96.009 4.511
72.509 4.830	78.409 4.753	84.309 4.674	90.209 4.593	96.109 4.509
72.609 4.828	78.509 4.752	84.409 4.673	90.309 4.591	96.209 4.508
72.709 4.827	78.609 4.751	84.509 4.671	90.409 4.590	96.309 4.506
72.809 4.826	78.709 4.749	84.609 4.670	90.509 4.588	96.409 4.505
72.909 4.825	78.809 4.748	84.709 4.669	90.609 4.587	96.509 4.504
73.009 4.823	78.909 4.747	84.809 4.667	90.709 4.586	96.609 4.502
73.109 4.822	79.009 4.745	84.909 4.666	90.809 4.584	96.709 4.501
73.209 4.821	79.109 4.744	85.009 4.664	90.909 4.583	96.809 4.499
73.309 4.820	79.209 4.743	85.109 4.663	91.009 4.581	96.909 4.498
73.409 4.818	79.309 4.741	85.209 4.662	91.109 4.580	97.009 4.496
73.509 4.817	79.409 4.740	85.309 4.660	91.209 4.579	97.109 4.495
73.609 4.816	79.509 4.739	85.409 4.659	91.309 4.577	97.209 4.494
73.709 4.814	79.609 4.737	85.509 4.658	91.409 4.576	97.309 4.492
73.809 4.813	79.709 4.736	85.609 4.656	91.509 4.574	97.409 4.491
73.909 4.812	79.809 4.735	85.709 4.655	91.609 4.573	97.509 4.489
74.009 4.811	79.909 4.733	85.809 4.653	91.709 4.572	97.609 4.488
74.109 4.809	80.009 4.732	85.909 4.652	91.809 4.570	97.709 4.486
74.209 4.808	80.109 4.731	86.009 4.651	91.909 4.569	97.809 4.485
74.309 4.807	80.209 4.729	86.109 4.649	92.009 4.567	97.909 4.484
74.409 4.806	80.309 4.728	86.209 4.648	92.109 4.566	98.009 4.482
74.509 4.804	80.409 4.727	86.309 4.647	92.209 4.564	98.109 4.481
74.609 4.803	80.509 4.725	86.409 4.645	92.309 4.563	98.209 4.479
74.709 4.802	80.609 4.724	86.509 4.644	92.409 4.562	98.309 4.478
74.809 4.800	80.709 4.723	86.609 4.642	92.509 4.560	98.409 4.476
74.909 4.799	80.809 4.721	86.709 4.641	92.609 4.559	98.509 4.475
75.009 4.798	80.909 4.720	86.809 4.640	92.709 4.557	98.609 4.474
75.109 4.796	81.009 4.719	86.909 4.638	92.809 4.556	98.709 4.472
75.209 4.795	81.109 4.717	87.009 4.637	92.909 4.555	98.809 4.471
75.309 4.794	81.209 4.716	87.109 4.636	93.009 4.553	98.909 4.469
75.409 4.793	81.309 4.715	87.209 4.634	93.109 4.552	99.009 4.468
75.509 4.791	81.409 4.713	87.309 4.633	93.209 4.550	99.109 4.466
75.609 4.790	81.509 4.712	87.409 4.631	93.309 4.549	99.209 4.465
75.709 4.789	81.609 4.711	87.509 4.630	93.409 4.548	99.309 4.464
75.809 4.787	81.709 4.709	87.609 4.629	93.509 4.546	99.409 4.462
75.909 4.786	81.809 4.708	87.709 4.627	93.609 4.545	99.509 4.461
76.009 4.785	81.909 4.707	87.809 4.626	93.709 4.543	99.609 4.459
76.109 4.783	82.009 4.705	87.909 4.625	93.809 4.542	99.709 4.458
76.209 4.782	82.109 4.704	88.009 4.623	93.909 4.540	99.809 4.456
76.309 4.781	82.209 4.703	88.109 4.622	94.009 4.539	99.909 4.455