

DISPOSITIVOS PARA DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CRISTAIS DE GELO EM SOLUÇÃO DE GELO LÍQUIDO

Ricardo Santos Nascimento – ricardo@uefs.br

Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Tecnologia, www.uefs.br

Rennan Yie Yassu Nishimori – nishimori97@gmail.com

Fellipe dias de Oliveira – fellipediasd@gmail.com

Fernando Dobbert Sanches – dobbertsanchesf@gmail.com

Vivaldo Silveira Junior – vivaldo@unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Departamento de Engenharia de Alimentos, www.unicamp.br

R1 - Sistemas, Equipamentos e Componentes

Resumo. O gelo líquido, também conhecido como pasta de gelo ou “ice slurry”, é um termo empregado para misturas contendo cristais de gelo em uma solução no estado líquido. O gelo líquido é uma tecnologia nova que tem mostrado grande potencial energético, pela sua capacidade de transportar energia como fluido térmico e armazenar “frio” por energia latente de fusão. Para que haja um controle eficiente do transporte dessa energia no gelo líquido, se faz necessário um sistema de medição da concentração de cristais de gelo de maneira rápida e precisa. O objetivo desse trabalho foi desenvolver um dispositivo capaz de mensurar a concentração de cristais de gelo em solução de gelo líquido. Nesse trabalho foram utilizados três princípios de medições: velocidade do som do fluido, condutividade elétrica e refração da luz. As medições foram realizadas com a solução em batelada, ou seja, sem vazão mássica. Para análise de viabilidade técnica foram realizadas medidas com uma solução modelo que simulasse a presença de micropartículas em solução. A solução modelo foi produzida com amido e microesferas de vidro, cuja concentração referencial foi determinada pela fração mássica de microesferas, enquanto a solução de gelo líquido foi produzida com água-etanol, cuja concentração referencial foi determinada pelo método de Calorimetria. Os experimentos de medições demonstraram tendências diretamente proporcionais a concentração de partículas e de cristais de gelo. Os resultados comprovaram a viabilidade e praticidade no desenvolvimento de um dispositivo capaz de medir concentração de cristais de gelo em solução de gelo líquido.

Palavras-chave: Sistema de medição, Gelo líquido, Ultrassom, Condutividade, Refração.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Medeiros (2010) o gelo líquido é uma tecnologia nova que tem mostrado grande potencial energético: além de transportar energia como fluido térmico, possui propriedade termoacumuladora pela presença de cristais de gelo, armazenando “frio” pela energia latente de fusão. Ele também tem um resfriamento rápido pois possui grande área de transferência de calor criada pela sua alta quantidade de partículas (KAUFFELD et al., 2010).

Sistemas de resfriamento com gelo líquido têm sido instalados em várias construções com o propósito de condicionamento de ar. Na maioria dos casos, os sistemas de produção de gelo líquido estão combinados com um sistema de termo-acumulação para armazenar energia durante a noite e usar durante o dia para satisfazer os picos de carga. O resultado são economias operacionais que podem ser feitas onde tarifas de pico de eletricidade estão presentes (BELLAS 2005).

Atualmente, torna-se importante a determinação da quantidade de sólidos presentes nas soluções de gelo líquido, de forma a avaliar instantaneamente a capacidade térmica do fluido. O equipamento ideal para essa medição deve ser preciso, com baixo tempo de resposta e economicamente viável.

Neste trabalho foram utilizados os métodos de calorimetria, ultrassom e condutividade elétrica a fim de determinar a concentração de cristais no gelo líquido. Existem obras que fazem referência ao uso desses métodos e comprovam a viabilidade dos mesmos.

Segundo Ticona (2003) e Hansen e Kauffeld (2001), várias propriedades termo físicas do gelo líquido podem ser usadas para determinar a concentração do gelo, sabendo se que as propriedades do gelo líquido diferem significativamente do gelo puro. As propriedades termo físicas do gelo líquido podem, em muitos casos, serem deduzidas por ponderação linear das propriedades do gelo e do líquido. Em seus trabalhos publicados, foram feitas medição de concentração pelo método calorimétrico. Neste método o processo apresentou baixo custo, porém a retirada da amostra causava distúrbio na vazão do processo.

Trabalhos com sensores de ultrassom demonstram ser uma metodologia eficaz na medição de concentrados em soluções. No trabalho apresentado por Langlois (2011) foi demonstrado um método com ultrassom capaz de medir com precisão a concentração de partículas em gelo líquido.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um dispositivo de leitura de concentração de cristais de gelo líquido em estado estático, por métodos de ultrassom, condutividade e refração.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para análise da viabilidade técnica, dos equipamentos de leitura utilizados, foi desenvolvida uma solução modelo com presença de microesferas de vidro em suspensão com concentrações até 30% de microesferas, considerando o limite operacional do gelo líquido que é de 30% de cristais de gelo. As leituras feitas na solução modelo foram realizadas em batelada, em temperatura ambiente de 28°C, após homogeneização da solução por agitação. Todas as leituras foram realizadas em triplicatas. Os métodos de leitura utilizados foram o ultrassom e a condutividade. O refratômetro não foi aplicado a solução modelo por inviabilidade operacional do equipamento.

Após confirmação da viabilidade técnica dos equipamentos foi feita a leitura de concentração em solução de gelo líquido. Os testes com o gelo líquido foram realizados em duas metodologias, a primeira foi realizada a medição direta dos particulados de cristais de gelo enquanto a segunda foi realizada medições indiretas através do fluido transportador, ou seja por meio da concentração do aditivo anticongelante na fase líquida do gelo líquido.

Em cada metodologia de medição foi estabelecido a correlação da leitura pela concentração por meio de modelos matemáticos. A modelagem matemática foi realizada por equações de regressão que estabelecem a correlação do valor medido pelo equipamento de medição em função da concentração de particulados (microesferas na solução modelo ou cristais de gelo na solução de gelo líquido).

2.1 Descrição dos equipamentos de medição

Em busca de desenvolver um dispositivo de medição de concentração com características de baixo custo e ainda assim preciso, foram utilizados equipamentos de fácil operação e disponível em laboratórios de pesquisa.

As medições da velocidade do som do fluido foram realizadas através de um medidor de vazão, da marca pFlow, modelo P118 *Ultrasonic transit-time flowmeter*. Cujos transdutores são montados do lado externo do tubo, arranjo *clamp-on*, com transmissão indireta, refletida na parede do tubo, com trajetória em “Z”, conforme Fig.1. Os transdutores foram instalados numa tubulação de CPVC de 28mm e foram calibrados com água destilada em temperatura ambiente de 28°C.

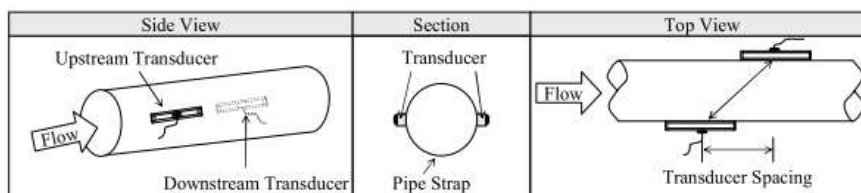


Figura 1. Posicionamento do sensor de ultrassom com trajetória em “Z”. Fonte: (PFLOW, 2014, p. 13).

As medições da condutividade térmica foram realizadas num condutímetro de bancada micro processado, da marca Quimis, modelo Q-795M2, com resolução de $0,1\mu\text{S}$, precisão de $\pm 10\mu\text{S}$ (0,5% do fundo de escala), reprodutibilidade de $\pm 3\mu\text{S}$ (0,15% do fundo de escala) e estabilidade de $\pm 6\mu\text{S}$ (0,3% do fundo de escala). O transdutor usado foi uma célula de constante $K=0,818$ de platina, com compensação automática de temperatura.

As medições de refração da luz foram realizadas no refratômetro de bancada, da marca Carl Zeiss, com faixa de medição de 1,3 a 1,7 índice de refração e de 0 a 95°Brix. A resolução do instrumento é de $\pm 0,0005\text{nD}$ (índice de refração), de $\pm 0,25^\circ\text{Brix}$ (para escala $<50^\circ\text{Brix}$) e de $\pm 0,005^\circ\text{Brix}$ (para escala $>50^\circ\text{Brix}$). As medidas foram feitas por luz refletida com prisma de iluminação em temperatura controlada por um banho térmico estabilizado em 20°C.

As medições pelo método de calorimetria foram realizadas em garrafas térmicas de 5 litros, cujos valores da capacidade térmica de cada garrafa, foram determinados experimentalmente em laboratório.

2.2 Produção da solução modelo

A solução modelo foi produzida com o objetivo de ter uma solução com partículas de diâmetro e concentrações conhecidas, para análise de viabilidade técnica dos sensores utilizados nas medições de concentrações de particulados. A solução modelo foi preparada pelo método de gelatinização do amido em água, por meio de aquecimento da solução, para isso foi utilizado 7,4% de amido de milho. Essa concentração de amido foi estabelecida experimentalmente de forma a manter as partículas em suspensão, com o mínimo de interferência possível nas medidas de concentração de partículas.

As partículas utilizadas na solução modelo são microesferas de vidro, da marca Plotters Industrial, tipo 3R, com diâmetros de $0,8\text{mm} \pm 0,1\text{mm}$.

A determinação da concentração de microesferas na solução modelo foi feita com referência na fração mássica do volume de esferas misturado na solução de amido gelatinizada.

2.3 Produção do gelo líquido

O gerador de gelo líquido é da marca Shiguen, modelo GGL-3, instalada no Laboratório de Automação e Controle de Processos de Alimentos (LACPA) da Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA) da Unicamp, Campinas-SP. O equipamento é composto por um tanque reservatório de gelo líquido, dois raspadores horizontais em série, e uma unidade condensadora da marca Bitzer, modelo, LH 144/4DC-7.2, composta por um motor, compressor e um condensador.

O ponto de congelamento do gelo líquido depende muito do aditivo anticongelante utilizado (álcool, propileno glicol e sal) e da concentração utilizada. Nesse trabalho o aditivo usado na formação do gelo líquido foi o álcool etílico, com concentração de 3,65°INPM. Esse aditivo foi escolhido devido ao seu baixo custo, quando comparado com outros tipos de álcoois e por não gerar corrosão nos equipamentos, como acontece quando se usa sais.

O ponto de congelamento para a solução água e álcool etílico, foi determinado experimentalmente analisando a variação de temperatura de diferentes concentrações, conforme demonstrado na Fig.2, nessa análise o ponto inicial de congelamento na concentração de 3,65°INPM é de -1,7°C. Observe que o supercongelamento da solução água-etanol ocorre antes da formação das primeiras partículas de gelo, em temperaturas até 3°C abaixo da temperatura de congelamento.

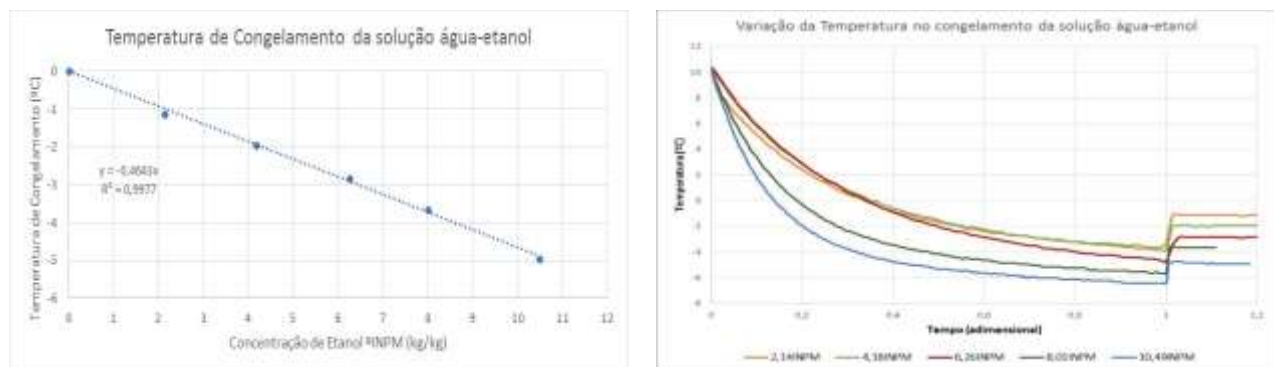


Figura 2. Gráfico de dispersão da temperatura de congelamento da solução água-etanol versus concentração de etanol (a esquerda), e gráfico de variação da temperatura no congelamento de soluções água-etanol com diferentes concentrações (a direita).

As partículas de gelo no gelo líquido são constituídas de água pura enquanto que a fase líquida é composta por água e aditivo. A medida que a o gelo é formado, a concentração de cristais de gelo aumenta e conseqüentemente a quantidade de aditivo também é aumentada na fase líquida remanescente, denominada também como fluido transportador.

Segundo Hansen e Kauffeld (2001) a concentração do aditivo (X_{af}) na fase líquida remanescente pode ser calculada pela Eq.1, onde (X_{0af}) é a concentração inicial de aditivo na solução de gelo líquido sem gelo e (X_{ice}) é a concentração de cristais de gelo.

$$X_{af} = \frac{X_{0af}}{1 - X_{ice}} \quad (1)$$

Durante a produção do gelo líquido a concentração de cristais de gelo é uma variável de processo não controlada, podendo variar com o tempo de funcionamento do equipamento, quanto mais tempo o gelo líquido recircular nos raspadores, maior será a concentração de cristais de gelo.

A produção do gelo líquido nesse trabalho foi limitada a uma concentração menor que 30% de cristais de gelo, pois concentrações muito altas de cristais de gelo torna o transporte não recomendado, devido a aglomeração e obstrução nas curvas das tubulações.

A determinação da concentração de cristais de gelo na solução de gelo líquido foi determinada pelo método de calorimetria, através do cálculo do balanço de energia, do equilíbrio térmico entre a solução de gelo líquido misturada a uma mesma solução aquecida. A concentração de cristais de gelo (X_{GL}) é determinada pela equação Eq.2.

$$X_{GL} = \frac{-M_{GL} \cdot Cp_{GL} \cdot (T_f - T_{GL}) + M_{SQ} \cdot Cp_{SQ} \cdot (T_f - T_{SQ}) + C_{garrafa} \cdot (T_f - T_{SQ})}{M_{GL} \cdot h_G} \quad (2)$$

Onde a energia do gelo líquido corresponde a energia latente do gelo, calculada pela fração mássica de cristais de gelo (X_{GL}) contida na massa total do gelo líquido (M_{GL}), cuja entalpia latente e (h_G) usada foi $334,94 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, somada com a energia da parte líquida do gelo líquido, cujo calor específico (Cp_{GL}) usado foi $4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, durante a variação de temperatura do gelo líquido (T_{GL}) até a temperatura final de equilíbrio (T_f).

Enquanto a energia fornecida pelos demais componentes do sistema é calculada pela capacidade térmica da garrafa ($C_{garrafa}$) somada a energia da solução quente, cuja massa total (M_{SQ}) e temperatura inicial (T_{SQ}), é conhecida e calor específico (Cp_{SQ}) igual ao do gelo líquido (Cp_{GL}), pois é a mesma solução.

2.4 Caracterização dos sensores

A área de instrumentação e controle de processos utiliza uma terminologia própria, que além de definirem as características do sistema de medição e controle também definem as características estáticas e dinâmicas dos diversos instrumentos utilizados (INSTRUMENTAÇÃO, 2011).

Nesse trabalho as características dos instrumentos de medição, analisadas para a leitura de concentração foram: a repetibilidade, sensibilidade, precisão, linearidade, alcance e a resolução.

A repetibilidade é a capacidade de reprodução da indicação ao se medir, repetidamente, valores idênticos da variável medida, nas mesmas condições de operação e no mesmo sentido de variação (INSTRUMENTAÇÃO, 2011).

A sensibilidade (ou ganho) é a razão entre o sinal de saída e de entrada para um dado sensor ou transdutor. A sensibilidade está ligada à relação entre uma variação na grandeza de entrada (ΔS) em questão e a variação na medida de saída fornecida pelo instrumento (ΔE). Um sensor muito sensível é aquele que fornece uma variação na saída para uma pequena variação da grandeza medida (THOMAZINI, 2011). A sensibilidade (S) pode ser retirada da curva de calibração, por meio da Eq.3.

$$S = \frac{\Delta S}{\Delta E} \quad (3)$$

A precisão é a qualidade que caracteriza a capacidade de um instrumento de medição fornecer a mesma leitura quando mede respectivamente a mesma quantidade sob as mesmas condições, não importando a concordância ou a discrepância entre o resultado e o valor medido. Segundo Ordonez (2006) o percentual da precisão (p) pode ser calculada pela Eq.4 a Eq.8.

$$p(\%) = 100\% - PE(\%) \quad (4)$$

$$PE(\%) = \left(\frac{PE}{\bar{x}}\right) 100 \quad (5)$$

$$PE = 2dp \quad (6)$$

$$dp = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{n}} \quad (7)$$

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (8)$$

Onde o provável erro (PE) corresponde ao dobro do desvio padrão (dp), e este é calculado através da média aritmética (\bar{x}) e do total de número (n) de medidas (x).

A linearidade é a curva obtida ao plotar os valores medidos por um transdutor sob teste contra os valores de um padrão. O sensor ou transdutor é linear quando as medidas de variações iguais de grandeza física geram variações iguais de sinal na saída do sensor.

O alcance representa a faixa de valores de entrada de um transdutor. É a diferença algébrica entre os valores superior e inferior da faixa de medida do instrumento (INSTRUMENTAÇÃO, 2011).

De acordo com Ordonez (2006) a resolução é a variação mínima na entrada que produz uma variação detectável na saída.

3. RESULTADOS

Os resultados das leituras de condutividade elétrica na solução modelo, apresentaram valores de condutividade diretamente proporcionais com relação ao aumento de concentrações de microesferas, com curva de tendência linear, conforme pode ser visto na Fig. 3, e cálculo de erro provável máximo de 1% do valor medido.

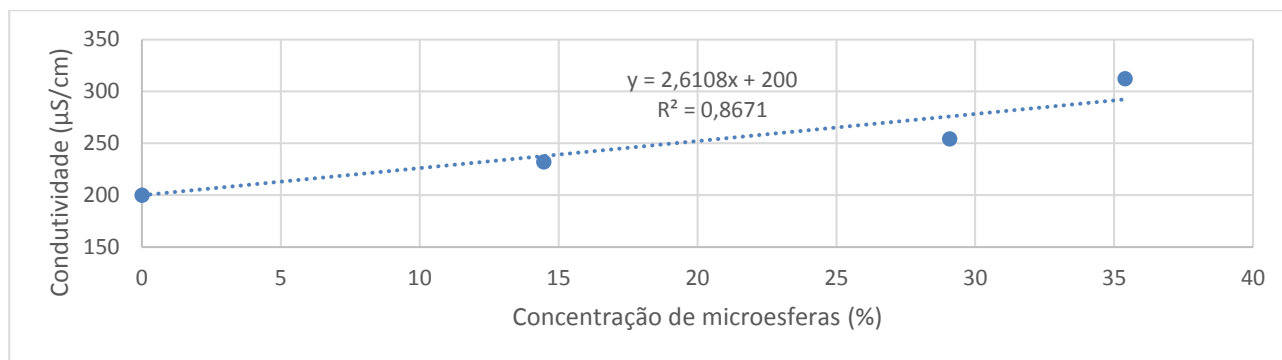


Figura 3. Gráfico de dispersão da Condutividade elétrica na Solução Modelo em diferentes concentrações de microesferas, com Curva de Tendência Linear e sua respectiva equação de regressão.

Os resultados das leituras de velocidade do som da solução modelo, apresentaram valores de condutividade proporcionais com relação ao aumento de concentrações de microesferas, com curva de tendência polinomial de 2º grau, conforme pode ser visto na Fig. 4, e cálculo de erro provável máximo de 0,2% do valor medido. O equipamento de leitura da velocidade do som do fluido apresentou restrições técnicas de leitura acima de 8% de concentração, pois a partir desse ponto o sensor do ultrassom exibiu uma baixa qualidade do sinal, inviabilizando a leitura.

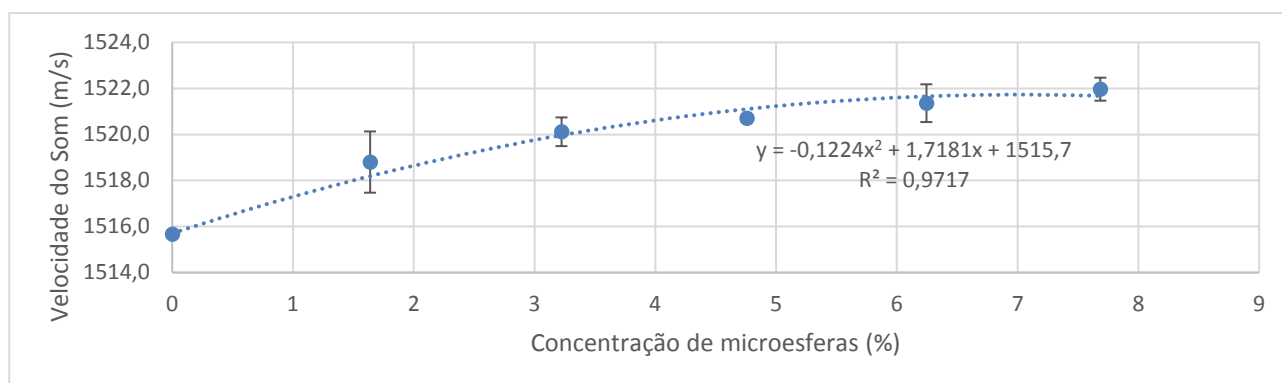


Figura 4. Gráfico de dispersão da Velocidade do som na Solução Modelo em diferentes concentrações de microesferas, com Curva de Tendência Polinomial e sua respectiva equação de regressão.

Dentre as condições analisadas, e diante os modelos matemático obtido pelas a equações de regressão em cada equipamento de leitura, foi possível determinar as características dos sensores, de ultrassom e de condutividade, para a leitura de concentração de microesferas na solução modelo, conforme Tab.1.

Tabela 1. Características dos instrumentos de medição, utilizado na leitura de concentração de microesferas.

	Condutímetro	Ultrassom
Sensibilidade	2,61 condutividade/ concentração	0,86 velocidade do som/concentração
Faixa de leitura	0 a 35% concentração microesfera	0 a 7% concentração microesfera
Alcance	35% concentração microesfera	7% concentração microesfera
Precisão	98,93% (valor medido)	99,84% (valor medido)
Resolução	0,4% concentração microesfera	0,03% concentração microesfera
Linearidade	Linear	Não linear
Repetibilidade	Ruim	Boa

Embora a leitura da concentração de microesferas, pelo método do ultrassom, esteja limitada a 7%, este método foi o que apresentou uma maior precisão e melhor resolução na leitura de concentração.

Usando o modelo de regressão, estimado nas Fig.3 e Fig.4, foi possível construir o gráfico de resíduo versus concentração de microesferas da Fig.5. A análise comparativa entre esses dois gráficos demonstra que o método do ultrassom possui os menores índices de resíduo, com valor máximo de 0,97 e média de 0,46. Enquanto que pelo método do condutímetro o valor máximo de resíduo foi de 8,26 e média de 4,5.

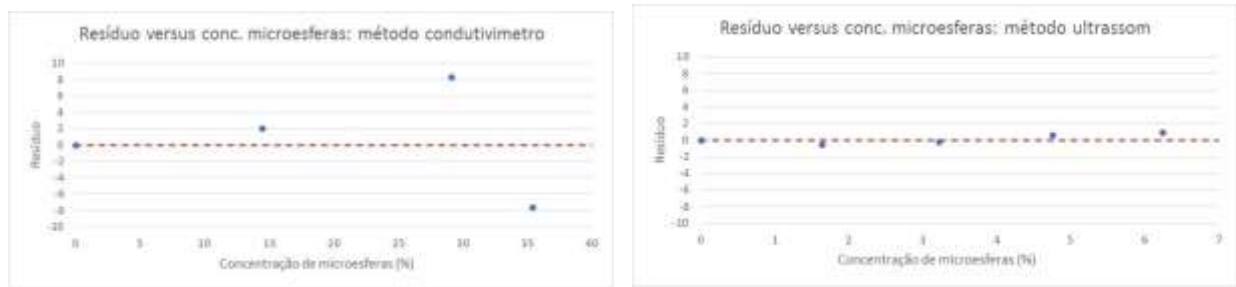


Figura 5. Gráfico de resíduo do modelo de regressão versus valores ajustado pelas respectivas equações de regressão criada pela leitura de condutividade (gráfico da esquerda) e velocidade do som (gráfico da direita).

Com experimentos realizados em bancada, identificamos que os sensores possuíam uma sensibilidade necessária para a leitura da variação de particulados, em concentrações até 10% com ultrassom e até 35% com o condutivímetro, na solução modelo. Considerando que a solução modelo possui uma viscosidade e densidade maior que a solução de gelo líquido, e considerando que a concentração de cristais de gelo na solução de gelo líquido é limitada a 30%, os resultados com a solução modelo demonstraram que os sensores utilizados são úteis na medição de concentração do gelo líquido.

Os experimentos realizados com gelo líquido pela primeira metodologia, com presença de particulados de cristais de gelo, não obteve resultados satisfatórios. A solução de gelo líquido em repouso tende a concentrar a fase sólida, os cristais de gelo, na superfície da solução inviabilizando a leitura de concentração por meio dos sensores, e quando a solução era submetida a uma agitação, para homogeneizar as duas fases, gerava interferências e oscilações nas leituras que tornava os erros e imprecisões muito acima do aceitável.

Os experimentos realizados na segunda metodologia teve como objetivo a leitura indireta da concentração de gelo por meio da concentração do aditivo anticongelante no fluido transportador. As medições foram feitas com o ultrassom, o condutivímetro e o refratômetro. Os valores das medidas (M) apresentados nos gráficos adiante estão em percentual de medida relativa (M_{REL}), sendo a referência (M_{REF}) a medida da solução de gelo líquido sem cristais de gelo, conforme Eq. 9.

$$M_{REL}(\%) = \left(\frac{M - M_{REF}}{M_{REF}} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

Os resultados das leituras de condutividade elétrica no fluido transportador da solução do gelo líquido, apresentaram valores de condutividade relativa diretamente proporcionais com relação ao aumento de concentrações de cristais de gelo, com curva de tendência linear, conforme pode ser visto na Fig. 6, e cálculo de erro provável máximo de 12,8% do valor medido. O erro máximo no cálculo da concentração de gelo foi de 1%.

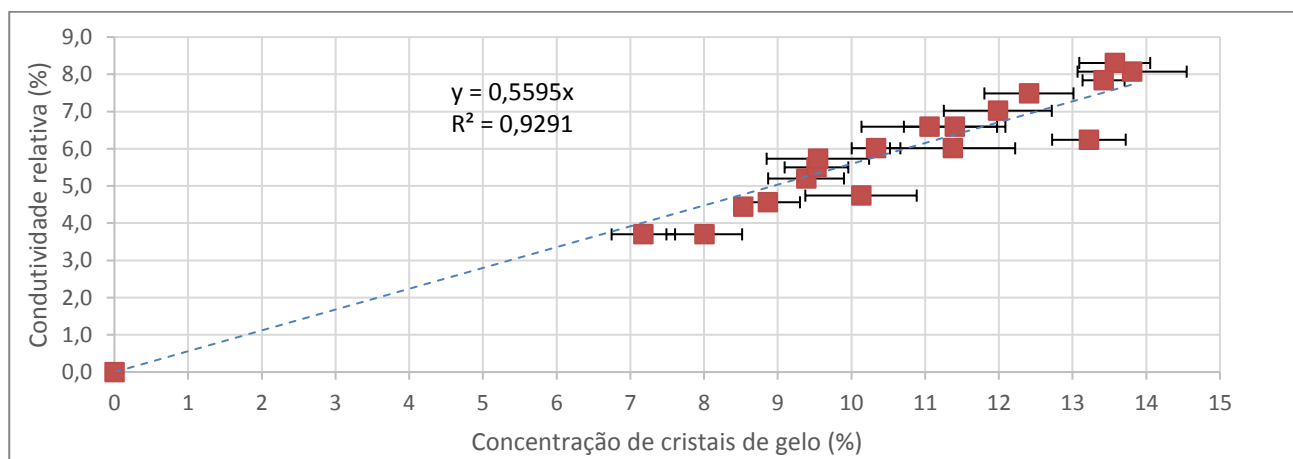


Figura 6. Gráfico de dispersão da Condutividade elétrica relativa em Solução de Gelo líquido, com Curva de Tendência Linear e sua respectiva equação de regressão.

Os resultados das leituras da velocidade do som do fluido transportador da solução do gelo líquido, apresentaram valores de velocidade relativa diretamente proporcionais com relação ao aumento de concentrações de cristais de gelo, com curva de tendência linear, conforme pode ser visto na Fig. 7, e cálculo de erro provável máximo de 75,7% do valor medido. O erro máximo no cálculo da concentração de gelo foi de 1%.

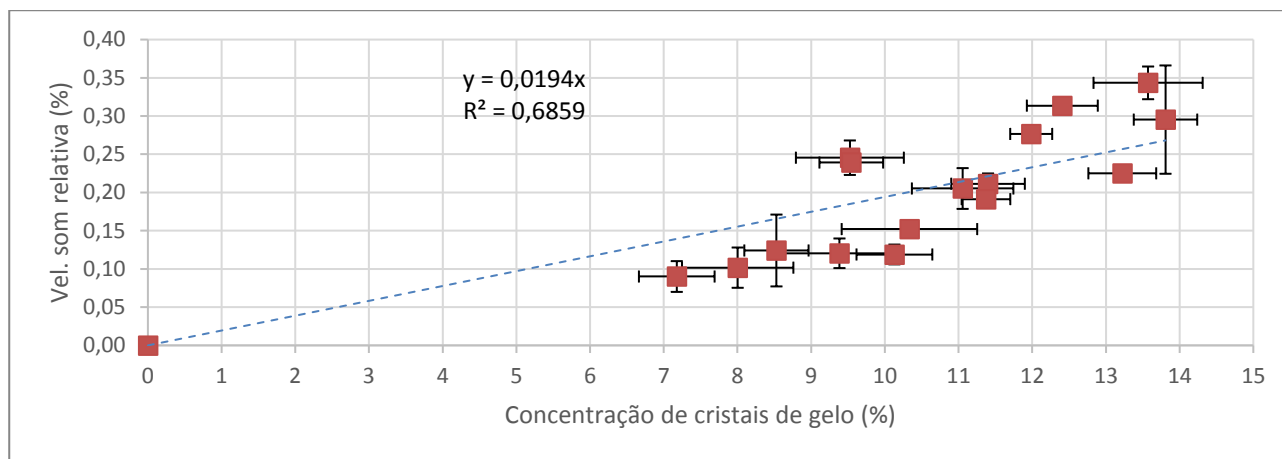


Figura 7. Gráfico de dispersão da velocidade do som relativo em Solução de Gelo líquido, com Curva de Tendência Linear e sua respectiva equação de regressão.

Os experimentos realizados com o refratômetro, para a leitura de grau Brix do fluido transportador da solução de gelo líquido, não gerou resultados satisfatórios, visto que para essa concentração de aditivo utilizada na solução de gelo líquido, a variação de aditivo no fluido portador não foi detectada pelo equipamento, cuja resolução de leitura é 0,5°Brix.

Dentre as condições analisadas, e diante os modelos matemático obtido pelas a equações de regressão em cada equipamento de leitura, foi possível determinar as características dos sensores, de ultrassom e de condutividade, para a leitura de concentração de cristais de gelo na solução de gelo líquido conforme Tab.2.

Tabela 2. Características dos instrumentos de medição, utilizado na leitura de concentração de cristais de gelo.

	Condutímetro	Ultrassom
Sensibilidade	0,56 condutividade relativa/ concentração de gelo	0,02 velocidade do som relativa/concentração de gelo
Faixa de leitura	7 a 14% concentração de gelo	7 a 14% concentração de gelo
Alcance	7% concentração de gelo	7% concentração de gelo
Precisão	87,17% (valor medido)	24,27% (valor medido)
Resolução	1,8% concentração de gelo	5,0% concentração de gelo
Linearidade	Linear	Linear
Repetibilidade	Boa	Boa

A leitura da concentração de cristais de gelo foi realizada entre a faixa de 7 a 14% podendo também ser aplicado a concentrações menores. Ambos os métodos demonstraram um modelo matemático linear com boa repetibilidade. O método do condutímetro foi o que apresentou maior sensibilidade às variações de concentração, maior precisão e melhor resolução.

Usando o modelo de regressão, estimado nas Fig.6 e Fig.7, foi possível construir o gráfico de resíduo versus concentração de cristais de gelo na Fig.8. A análise comparativa entre esses dois gráficos demonstra que o método do condutímetro possui os menores índices de resíduo, com valor máximo de 2,06 e média de 0,75. Enquanto que pelo método do ultrassom o valor máximo de resíduo foi de 4,13 e média de 2,28.

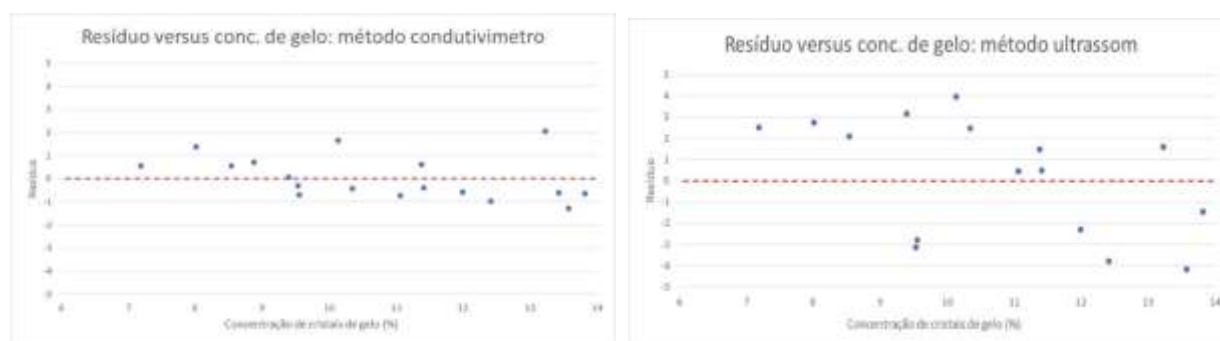


Figura 5. Gráfico de resíduo do modelo de regressão versus valores ajustado pelas respectivas equações de regressão criada pela leitura de condutividade (gráfico da esquerda) e velocidade do som (gráfico da direita).

4. CONCLUSÃO

Os resultados experimentais obtidos no presente trabalho permitiram as seguintes conclusões:

- Apesar da medição da concentração de microesferas por ultrassom ter apresentado bons resultados, a leitura por condutividade demonstrou não ter restrições na leitura de altas concentrações de microesferas, com características lineares e melhor sensibilidade da leitura do equipamento por concentração de microesferas.
- As medições de concentração de cristais de gelo em repouso não apresentam bons resultados, a melhor maneira de realizar as análises é fazendo a medição indireta.
- Para pequenas variações na concentração de aditivo no fluido portador, o refratômetro não foi capaz de detectá-las, tornando-se um método de medição inviável para essas concentrações.
- Em busca de uma medição mais precisa da concentração de cristais de gelo na solução, o condutímetro mostrou-se capaz de identificar variações menores, 1,8% contra 5% do ultrassom.

5. REFERÊNCIAS

- BELLAS, I.; TASSOU, S. A. 2005. Present and future applications of ice slurries. *International Journal of Refrigeration*, 28, 115–121.
- HANSEN, T. M.; KAUFFELD, M. 2001. Measuring principles for the determination of ice concentration in ice slurry. *ASHRAE*. v. 107 PART 2, p. 336–345.
- INSTRUMENTAÇÃO industrial. 2011. Organização de Egídio Alberto Bega. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: Interciência. 668 p., il. ISBN 9788571932456 (broch.).
- KAUFFELD, M.; WANG, M. J.; GOLDSTEIN, V.; KASZA, K. E. 2010. Ice slurry applications. *International Journal of Refrigeration*, 33(8), 1491–1505. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700710001647?via%3Dihub>>. Acesso em: 01 jun. 2017.
- LANGLOIS, V. et al. 2011. Ultrasonic determination of the particle concentration in model suspensions and ice slurry. *International Journal of Refrigeration*. v. 34, n. 8, p. 1972–1979. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014070071100154X#>>. Acesso em: 4 jun. 2017
- MEDEIROS, P. S. G.; BARBOSA, C. R. F.; FONTES, F. De A. O. 2010. Fluidos secundários bifásicos: a inserção da pasta de gelo como fluido termoacumulador em sistemas de refrigeração. *Mercofrio 2010 - Congresso de Climatização e Refrigeração*.
- ORDONEZ, E. D. M.; PENTEADO, C. G.; SILVA, A. C. R. 2006. *Microcontroladores e FPGAs - Aplicações em Automação*. 1 ed. São Paulo: Novatec.
- PFLOW. 2014. *Ultrasonic Flowmeter Instruction Manual*. Model: P118. 2. ed. [S.l.]: [s.n.].
- THOMAZINI, D. 2011. *Sensores industriais: fundamentos e aplicações*. Coautoria de Pedro U. B. de Albuquerque. 8. ed. rev. e atual. São Paulo, SP: Érica, c2005. 224 p., il. ISBN 9788536500713 (broch.).
- TICONA, E. M. 2003. *Determinação experimental do coeficiente de troca de calor em um gerador de pasta de gelo*. Rio de Janeiro, RJ: Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

DEVICES FOR DETERMINING THE CONCENTRATION OF ICE CRYSTALS IN LIQUID ICE SOLUTION

Abstract. *Liquid ice, also known as ice slurry, is a term used for blends containing ice crystals in a liquid solution. Liquid ice is a new technology that has shown great energy potential, for its ability to transport energy as a thermal fluid and to store "cold" by latent fusion energy. In order to have an efficient control of the energy transport in the liquid ice, a fast and precise system of measuring the concentration of ice crystals is necessary. The objective of this project was to develop a device capable of measuring the concentration of ice crystals in liquid ice solution. In order to realize, three principles of measurement were used: the sound velocity on fluid, electrical conductivity and light refraction. The measurements were carried out with the solution in batch, in other words, without mass flow. For technical feasibility analysis, measurements were made with a model solution that simulated the presence of microparticles in solution. The model solution was produced with starch and glass microspheres, whose referential concentration was determined by the microsphere mass fraction, while the liquid ice solution was produced with water-ethanol, whose reference concentration was determined by the Calorimetry method. Measurement experiments showed trends directly proportional of particles concentration and ice crystals. The results proved the feasibility and practicality in the development of a device capable to measure the concentration of ice crystals in liquid ice solution.*

Keywords: Measuring system, Liquid ice, Ultrasound, Conductivity, Refraction.