

Intravenous Electromedical Equipment: A Proposal to Improve Accuracy in Generating Alerts

Fabrcio N. Ferreira
and Leonardo Jofo
Universidade Federal de Pelotas
Email: {fferreira, ldrsjoao}
@inf.ufpel.edu.br

Jofo L. B. Lopes
Instituto Federal Sul-rio-grandense
Email: joalopes
@cavg.ifsul.edu.br

Adenauer C. Yamin
and Luciano V. Agostini
Universidade Federal de Pelotas
Email: {adenauer, agostini}
@inf.ufpel.edu.br

Abstract—The incidence of false alerts in a hospital environment undermines the health professionals' tasks, since: (i) they stressful the teams, their caregivers and the patients themselves; (ii) promote additional costs of time and attention; (iii) may cause risky situations, some of which have severe health implications in patients. Considering this scenario, the objectives of this work are to discuss the occurrence of alerts in intravenous systems and to contribute to the reduction of the emission of false alerts in electromedical equipments, in particular in infusion pumps. To this purpose, the developed proposal, called BIRB, explores the use of Bayesian Networks to minimize the occurrence of false alerts when occurs a change in the flow rate caused by occlusions in infusion pumps. The occlusion is the procedure with the highest index of false alerts in this type of equipment. The achieved results with the BIRB proposal are promising, reaching 85% of accuracy, based on data from actual infusion pumps.

I. INTRODUÇÃO

Os equipamentos eletromédicos intravenosos têm por finalidade auxiliar na administração de medicamentos e estão organizados em dois grandes tipos: (i) sem gerenciamento eletromecânico, com infusão gravitacional; e (ii) com gerenciamento eletromecânico, dispondo de características autônomas, como bombas de insulina para tratamento de diabete, bombas de sangue que auxiliam no bombeamento do coração e bombas de infusão com aplicações de uso geral [1].

As bombas de infusão são os equipamentos foco deste trabalho, por se destacarem em dois aspectos: (i) estarem entre os equipamentos eletromédicos mais empregados em hospitais; e (ii) serem responsáveis por altos índices de falsos positivos quando da geração de alertas [2].

As bombas de infusão, enquanto equipamentos eletromédicos autônomos, têm a função de regular o escoamento de líquidos já administrados ao paciente sob pressão positiva gerada por ela própria [3], com a pressão de escoamento superior à pressão do sangue do paciente [4]. Assim, as bombas são responsáveis por gerar e manter uma pressão suficiente sobre a medicação para que ela possa fluir pela linha de infusão, dado seu comprimento, diâmetro, válvulas, filtros e restrições impostas pelo corpo humano.

Desta forma, para uma bomba de infusão manter constante a taxa de escoamento de líquidos, o seu bombeamento deverá procurar compensar as variações de pressão na linha de infusão. Entretanto, esta compensação tem limites eletro-

mecânicos e, uma vez perdida a capacidade de manutenção da vazão de infusão, um alerta deverá ser gerado.

No ambiente hospitalar, em especial onde se usa as bombas de infusão, um falso alarme positivo cria uma mobilização desnecessária, o que pode levar a uma diminuição dos cuidados para com o paciente. Alertas desnecessários podem gerar implicações relacionadas à fadiga auditiva, contribuindo para o aumento do estresse em um ambiente já potencialmente tenso. Ainda, falsos alarmes podem potencializar a desconfiança com relação ao equipamento em uso [5].

A recorrência de falsos alarmes pode fazer, até mesmo, com que o profissional silencie o sistema de alertas dos equipamentos, elevando os riscos clínicos dos pacientes. Por sua vez, os alarmes falsos negativos, apesar de também trazerem implicações de diversas naturezas para o tratamento clínico, apresentam um patamar bem mais reduzidos de incidência [6].

Tendo como motivação o fato das bombas de infusão estarem entre os equipamentos eletromédicos com maior incidência de falsos alertas [7], este artigo apresenta uma proposta que tem como objetivo explorar Redes Bayesianas nas tomadas de decisão para a emissão de alertas. A proposta denomina-se Bombas de Infusão com Redes Bayesianas (BIRB) e tem por premissa uma operação autônoma quando da verificação da alteração na taxa de escoamento do líquido infundido, devido a uma oclusão total ou parcial na linha de infusão.

O emprego de Redes Bayesianas na proposta BIRB, através da exploração das probabilidades condicionais, apresenta características que podem contribuir para a confiabilidade no gerenciamento dos alertas em bombas de infusão, atingindo uma precisão de 85% e reduzindo, assim, os falsos positivos a 15%. Esse percentual, considerando a literatura corrente, caracteriza a proposta BIRB como promissora. Segundo [8], os falsos positivos em equipamentos eletromédicos de cuidados intensivos podem atingir patamares elevados (até 90%).

Este trabalho está estruturado como segue. Na Seção II são apresentados os aspectos das administrações de medicamentos intravenosos, o cenário de aplicação da proposta BIRB, bem como o cenário dos alarmes em bombas de infusão. Na sequência, a Seção III apresenta as diretrizes para avaliação de equipamentos eletromédicos definidas por órgãos governamentais. A seção IV discute os trabalhos relacionados que

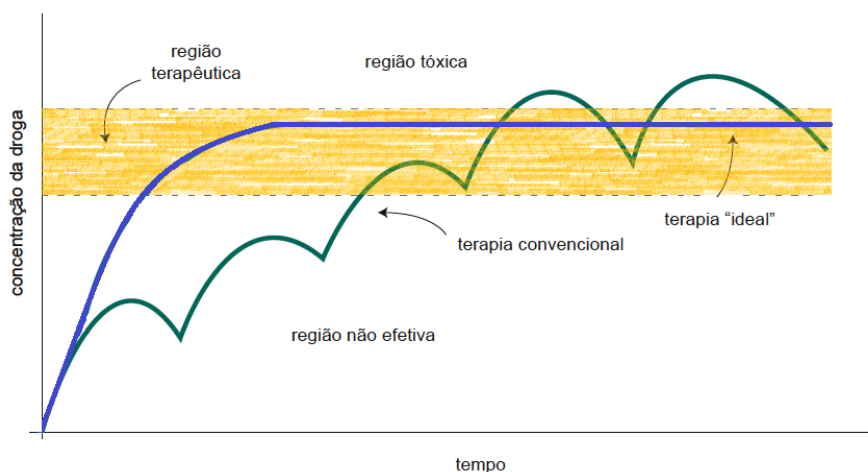


Figura 1. Comparação da evolução da concentração de medicamento x tempo.

exploram a aplicação de Redes Bayesianas na área de saúde. A Seção V apresenta a proposta BIRB, que explora as Redes Bayesianas no controle da taxa de escoamento de bombas de infusão, através da identificação de oclusão na linha de infusão. Na Seção VI é discutida a análise da precisão obtida com a utilização da proposta BIRB. Por fim, na Seção VII são apresentadas as conclusões deste trabalho.

II. ADMINISTRAÇÃO DE MEDICAMENTOS INTRAVENOSOS: CENÁRIO DE PRECISÃO DA PROPOSTA BIRB

Para iniciar um tratamento com medicamentos, os parâmetros de corrente, taxa de entrega e concentração do medicamento devem ser calculados. Para isso, são consideradas características do paciente, tais como: peso e idade [9]. No decorrer do tratamento, qualquer modificação na taxa de entrega de medicamento irá causar uma alteração na ação terapêutica.

Na Figura 1 é mostrada uma comparação da evolução da concentração do medicamento ao longo do tempo para uma terapia dita “ideal” com as linhas das curvas na cor azul (feita com sistemas de infusão intravenoso) e a terapia convencional com as linhas das curvas na cor verde (feita com injeções ou pílulas de forma não intravenosa). Na região denominada não efetiva, a concentração de medicamento fica abaixo da região terapêutica e, na tóxica, fica acima.

A bomba de infusão é utilizada quando se necessita de precisão na administração, fluxo constante de entrega de medicamento e controle automático da operação do procedimento terapêutico. No seu uso, é muito grande a responsabilidade pelas indicações das situações de alarmes ocasionados por anomalias que alteram ou impeçam a entrega do medicamento. Nas bombas de infusão atuais há uma grande preocupação sobre os riscos de falhas, pois, de acordo com [10], há alto número de registros de falhas em equipamentos eletromédicos nos hospitais brasileiros, falhas essas que, em casos extremos, são responsáveis por implicações severas na saúde nos pacientes.

Os procedimentos médicos que exigem o emprego de bombas de infusão costumam acontecer em ambientes que usualmente requerem concentração dos profissionais de saúde. Como exemplos destes ambientes, temos Unidades de Tratamento Intensivo e centros cirúrgicos, onde o paciente requer muitos cuidados devido às suas limitações de saúde. Nesses ambientes, os pacientes frequentemente necessitam de múltiplas infusões contínuas e simultâneas, podendo ser usadas várias bombas de infusão em um único paciente [11]. Por outro lado, os demais equipamentos de suporte à vida presentes nestes ambientes são usados em quantidades menores, muitas vezes unitárias, como por exemplo, um respirador artificial, um desfibrilador e um monitor multiparamétrico [12].

A Figura 2 caracteriza uma sala cirúrgica no momento de um procedimento em que é exigido o uso de seis bombas de infusão, contrastando em número com os outros equipamentos empregados.



Figura 2. Procedimento em sala cirúrgica, com vários equipamentos eletromédicos.

Adaptado de [13]

Os equipamentos eletromédicos, na sua operação, fazem indicações de alarmes e disputam com o paciente a atenção dos profissionais da saúde. Obviamente, os alarmes são importantes, pois caracterizam situações potencialmente anormais durante o funcionamento destes equipamentos. Neste cenário, a ocorrência de alarmes falsos positivos além de causar des-

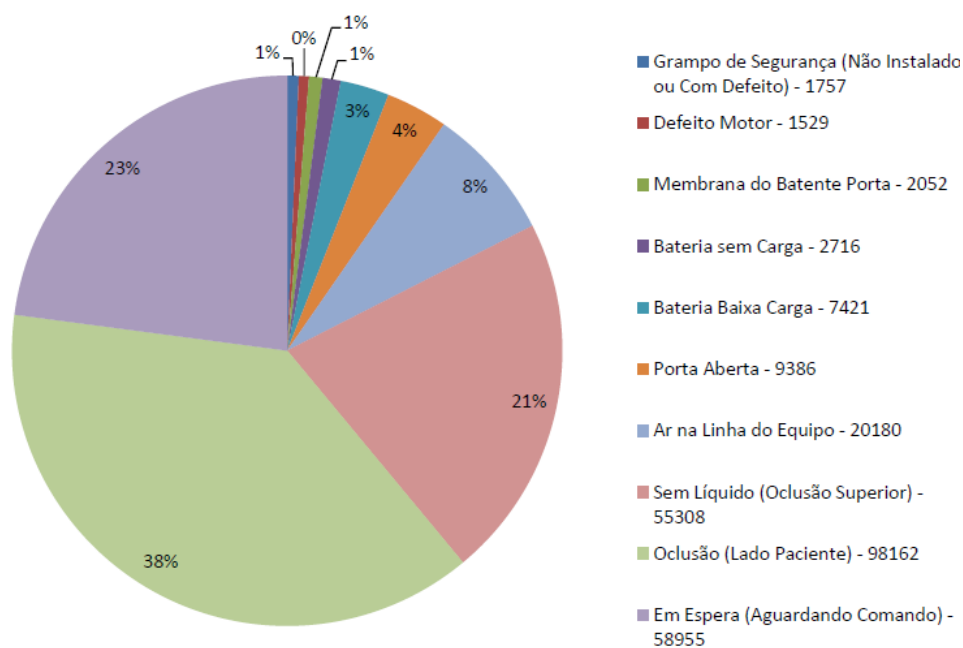


Figura 3. Dez erros mais usuais em bombas de Infusão.
Adaptado de [14]

conforto, pode provocar ações desnecessárias por parte das equipes envolvidas.

A. Principais Anomalias em Bombas de Infusão

As bombas de infusão constituem hoje a grande maioria dos equipamentos utilizados para administração de medicamentos de forma intravenosa. No trabalho de [14] foi feito um estudo dos registros dos erros ocorridos em bombas de infusão durante sua operação. Foram empregados os registros disponíveis nos logs produzidos pelo sistema de monitoramento interno das bombas. Ao todo, foram analisadas 131 bombas de infusão em um hospital de grande porte, totalizando aproximadamente 360.000 horas de avaliação durante um período de tempo de 2 anos. Foram gerados, ao todo, 260.129 alarmes, com a média de 356 alarmes por dia.

Na Figura 3, estão caracterizados os tipos de alarmes, as incidências e o percentual da quantidade de cada tipo. O alerta de oclusão ocupa o primeiro lugar em relação às incidências de alertas em bombas de infusão. A detecção do alerta de oclusão é feita, usualmente, através da leitura da pressão do líquido bombeado. A oclusão em bombas infusão consiste na obstrução parcial ou total do tubo da linha de infusão, denominado de equipo, dificultando ou impossibilitando o escoamento do líquido de infusão e ampliando a pressão atuando sobre o líquido infundido.

No caso da infusão de medicamentos com baixo fluxo, onde o bombeamento de líquido ocorre em quantidades inferiores a 100 mL por hora, as situações de oclusões geram pouco acréscimo de pressão ao longo do tempo, tornando mais crítica a sua detecção. Se a oclusão não for detectada, além da não

entrega do medicamento, também poderá ocorrer a perda do acesso ao sistema intravenoso do paciente [14].

Em relação aos riscos relacionados ao uso de tecnologias na área da saúde, o órgão americano *Emergency Care Research Institute* – ECRI, faz um ranqueamento anual dos dez principais perigos no ambiente hospitalar. No ano de 2017 os erros de infusão ficaram em primeiro lugar, por serem vitais aos pacientes [15]. Outro relato é informado pela agência europeia *National Health Service* - NHS, reguladora de medicamentos e produtos de saúde, que mostra que o número de incidentes adversos dos dispositivos de infusão está aumentando anualmente [16].

Também, se adiciona a esse cenário negativo às reclamações de defeitos em equipamentos eletromédicos que não apresentam falhas funcionais. Em uma análise no banco de dados de um hospital da cidade de São Paulo, ficou evidente que as falhas em bombas de infusão são superiores a 50%, e estas falhas possuem como principal diagnóstico o defeito não detectado, ou seja, o registro da engenharia clínica de reclamações de defeitos por parte dos usuários para equipamentos que não apresentam defeitos técnicos. A caracterização como defeituosas destas bombas de infusão ocorre por conta do registro de reclamações dos profissionais da área da saúde com a elevada incidência de falsos alarmes [17].

Em relação às tecnologias empregadas no gerenciamento de alarmes para a detecção de situações anormais na linha de infusão, tem-se alguns relatos de pesquisadores que apontam que os equipamentos atuais são considerados um retrocesso tecnológico de aproximadamente 20 anos, do ponto de vista clínico [8], [18], [19], [20].

De acordo com [8], são urgentes as melhorias necessárias

na tomada de decisão dos alertas e a implementação de sistemas computacionais autônomos de controle que analisem os sinais captados por sensores, tendo em vista alta incidência de geração de falsos alertas em cuidados intensivos.

As incertezas sobre alarmes falsos também são citadas em relatos de pesquisadores da área médica nos últimos 19 anos, os quais clamam por pesquisas/implementações tecnológicas que busquem soluções inovadoras para a diminuição da quantidade de alarmes falsos gerados por equipamentos eletromédicos [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23].

B. Detecção de Oclusão em Bombas de Infusão

A premissa básica deste trabalho é que uma maneira de reduzir os alarmes falsos em bombas de infusão seria a melhoria da detecção de oclusão nestes equipamentos, uma vez que as oclusões apresentam a maior incidência nas estatísticas de geração dos alertas. Esta situação fica evidenciada na Figura 3, que apresenta os principais tipos de erros em bombas de infusão.

A detecção da oclusão é tipicamente feita com dois tipos de sensores: não invasivos (sem contato direto com o líquido de infusão) ou invasivos (com contato direto com o líquido de infusão). Em geral, as bombas de infusão utilizam os sensores não invasivos, contribuindo para: (i) eliminar o risco de contaminação cruzada em função da transferência de microrganismos de um material contaminado para outro; e (ii) evitar o fluxo de corrente elétrica através do paciente [24]. O sensor não invasivo, por outro lado, apresenta um aspecto inferior em relações aos sensores invasivos, pois possuem uma sensibilidade inferior para a leitura da pressão na linha de infusão [25].

Como já mencionado, os sensores invasivos são mais sensíveis, mas por entrarem em contato físico com o líquido de infusão requerem dupla isolamento elétrico contra choque elétrico classe II [26]. Se utilizados, esses sensores também devem evitar a contaminação cruzada e, para tanto, devem ser descartáveis, como as mesmas características do tubo da linha de infusão (equipo), que tem o prazo de validade de 24 horas e de uso único.

O emprego dos sensores invasivos em bombas de infusão é inviabilizado, na maioria das vezes, por elevar o risco de choque elétrico para o paciente [26], além de ampliar o custo do tratamento.

As desvantagens dos sensores não invasivos são as flutuações no sinal elétrico, cujas principais causas são: (i) acomodação física quando da instalação do equipo, podendo estar torcido, com dobras excessivas na linha de infusão, etc.; e (ii) tolerâncias de fabricação, que implicam em variações no diâmetro, comprimento e dureza do próprio equipo. Essas características afetam o sinal coletado e, assim, contribuem para geração dos falsos alertas.

Com relação à geração dos alertas, do ponto de vista dos profissionais da saúde, a expectativa é que todas as situações anormais deverão ser imediatamente identificadas com a emissão de alertas, de modo que sejam logo corrigidas para não comprometer o tratamento de infusoterapia.

III. DIRETRIZES PARA AVALIAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELETROMÉDICOS

A Organização Panamericana da Saúde promoveu um estudo que apresenta diretrizes, metodologias e pareceres técnico científicos sobre a avaliação de equipamentos médicos. No Brasil, o relato deste estudo foi organizado pela Universidade Federal de Santa Catarina, pela Universidade Federal do Amazonas e por membros da Rede Brasileira de Avaliação de Tecnologias em Saúde e teve o apoio do Ministério da Saúde, por meio do Departamento de Ciência e Tecnologia, da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos e da Agência Nacional de Vigilância Sanitária [27], [28].

O esforço dos órgãos envolvidos tem por objetivo criar propostas de melhorias na usabilidade de equipamentos médicos, que podem ser compreendidas como uma característica do fator humano no relacionamento à facilidade de uso, efetividade, eficiência e satisfação do usuário. Neste sentido, a premissa é que a usabilidade deva ser considerada no desenvolvimento dos produtos eletromédicos. Na Figura 4 é apresentado o modelo sugerido pelos órgãos.

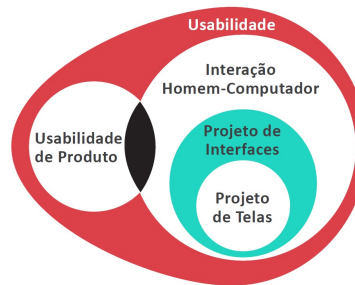


Figura 4. Usabilidade em Equipamentos Eletromédicos
Fonte [27]

Nesse estudo, é evidenciada a preocupação de vários órgãos e entidades ligados à saúde, sobre as características de usabilidade dos equipamentos eletromédicos. Neste escopo, a proposta BIRB apresentada nesse trabalho tem por objetivo contribuir com soluções para essas preocupações dos órgãos governamentais, qualificando a interação homem-computador nas bombas de infusão de forma a torná-la mais amigável e eficiente, particularmente no que diz respeito a geração de alertas.

IV. DISCUSSÃO DE TRABALHOS RELACIONADOS

Os trabalhos relacionados que envolvem aplicação das Redes Bayesianas na melhoria da precisão das tomadas de decisão na área da saúde são discutidos nesta seção. Estes trabalhos selecionados apresentam como semelhança a preocupação na confiabilidade da identificação correta das situações operacionais de equipamentos na área da saúde.

Em Forfang [29] foi proposto um método de administração de meios de contrastes intravenosos, onde é feita a classificação automática dos estados de fluxo de injeção. O método combina uma Rede Bayesiana e um classificador de Kernel. A Rede Bayesiana captura as dependências entre

variáveis latentes, observações e estados anteriores do sistema. O classificador de Kernel é uma Máquina de Vetor de relevância adequada para análise espectral e que fornece uma estimativa probabilística.

Na Figura 5 são apresentadas as dependências em termos de Rede Bayesiana em seu estudo. Os círculos são variáveis estatísticas e as setas indicam uma dependência estatística. Círculos com preenchimento são variáveis observadas e círculos brancos são variáveis latentes. O “...” e a seta pontilhada à esquerda ilustram uma cadeia de dependências do tempo 1 ao tempo n-1.

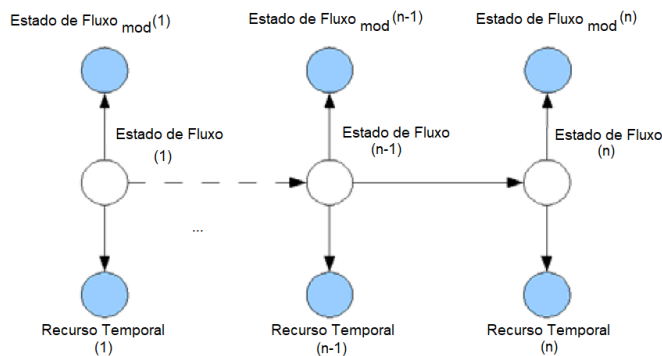


Figura 5. Modelo de dependência.
Adaptado de [29]

Os resultados preliminares mostraram que é possível a detecção automática do estado da injeção de contraste. O artigo também discute um novo modelo estatístico em particular que pode ser instanciado com base nos dados de ultrassonografia Doppler.

No trabalho de [30], a Rede Bayesiana foi empregada como uma classificadora, onde a rede é um sistema de apoio na decisão médica. O problema abordado consiste na identificação de Extra-Sístoles Ventriculares em registros de Eletrocardiograma - ECG. A motivação para o uso de Redes Bayesianas é o fato delas serem adequadas para o tratamento de incerteza. A inferência probabilística é indicada para modelar este tipo de problema, por representá-lo utilizando variáveis aleatórias, passíveis de alteração.

Para sua aplicação foi necessária a identificação das variáveis aleatórias. O trabalho utilizou as informações de batimento cardíaco (prematura e ventricular) adicionadas por especialistas. Os dados foram separados em 75% para treinamento e cálculos das probabilidades, e 25% para teste e apresentação dos resultados.

Na Figura 6 são demonstradas as variáveis da Rede Bayesiana.

Os resultados experimentais apresentados permitem observar que a Rede Bayesiana é um classificador adequado para o problema tratado.

No trabalho de [31] foram desenvolvidos modelos preditivos que permitem aos médicos compreender e explorar melhor os dados clínicos dos pacientes, juntamente com os fatores de

risco, para úlceras por pressão em pacientes internados em unidades de terapia intensiva. A identificação de fatores de risco precisos de úlceras de pressão é essencial para determinar as estratégias de prevenção apropriadas.

A Rede Bayesiana foi construída a partir das características dos pacientes. Essas informações foram procedentes dos seus exames e medicações. A Figura 7 mostra o fluxograma do estudo, que inclui as etapas de: aquisição de dados, preparação de dados, seleção de variáveis, construção da Rede Bayesiana e previsão de modelos.

O modelo de previsão construído com a Rede Bayesiana, permitiu ter diagnósticos na prevenção da incidência de úlcera por pressão e compreender melhor a estrutura dos fatores de risco relacionados à saúde do paciente. Os resultados dos modelos permitiram aos clínicos identificar as fortes relações entre fatores de riscos de patologia.

Os trabalhos relacionados discutidos contemplam o emprego de Redes Bayesianas em equipamentos eletromédicos, com emprego em três frentes: (i) administração do estado da injeção de contrastes; (ii) identificação de Extra-Sístoles; e (iii) fatores de risco para úlceras por pressão. É importante destacar que não foram encontrados trabalhos com exploração das Redes Bayesianas especificamente no foco deste trabalho, que é o controle de alertas associados à alteração da taxa de escoamento em bombas de infusão.

V. PROPOSTA PARA MELHORIA DA PRECISÃO NA GERAÇÃO DE ALERTAS EXPLORANDO REDES BAYESIANAS

A proposta BIRB, contribui para qualificar a detecção de oclusão, uma vez que a maior incidência de falsos alertas em bombas de infusão está relacionada a este aspecto.

Na detecção de oclusão, é necessário efetuar a leitura da pressão na linha de infusão. Na proposta BIRB, a leitura da pressão na linha de infusão é feita de forma não invasiva, sem contato direto com o líquido entregue ao sistema intravenoso.

Para obter os dados de leitura de pressão em diferentes situações, optou-se pelo uso de bombas de infusão e equipos comerciais [32], gentilmente cedidos pela empresa Lifemed Industrial de Equipamentos e Artigos Médicos e Hospitalares S.A

A. Obtenção dos Dados das Infusões Normais e Anormais

Para obtenção dos dados foram utilizadas três bombas de infusão, sendo coletadas e registradas leituras de pressão da infusão em situação normal ou anormal de operação. Os dados compõem dois tipos de cada situação, sendo eles:

- 1) Infusão Normal - **Livre**: a linha de infusão com final de linha em aberto, com uma baixa restrição ao deslocamento de líquido;
- 2) Infusão Normal - **Pressão Constante**: mantém-se uma pressão manométrica constante e diferente de zero e menor que a máxima pressão permitida, a qual deverá ser vencida pelo escoamento de líquido da bomba de infusão;
- 3) Infusão Anormal - **Ocluído**: inicia a infusão já com restrição total impedindo a passagem de líquido;

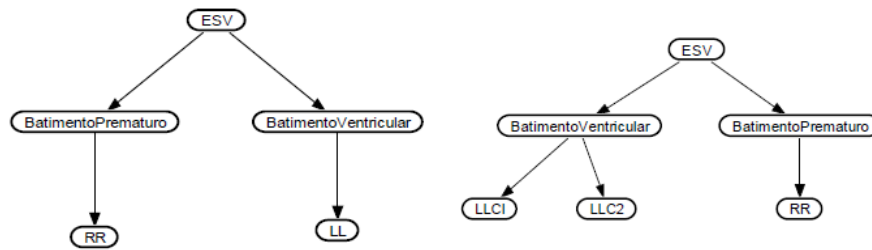


Figura 6. Variáveis da Rede Bayesiana.

Fonte [30]

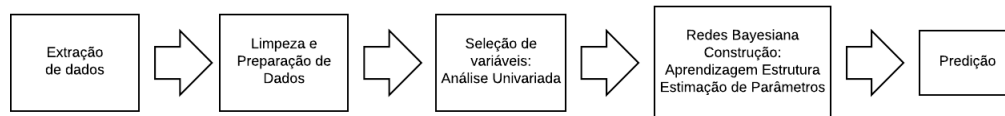


Figura 7. Fluxograma do Método.
Adaptado de [31]

4) Infusão Anormal - **Transição**: inicia a infusão com baixa restrição (livre), e após um tempo determinado e conhecido, o equipo é totalmente ocluído.

Na Figura 8, são ilustradas as conexões no final de linha de infusão do equipo para as situações normais “Livre” e “Pressão Constante” e anormal “Ocluído”.

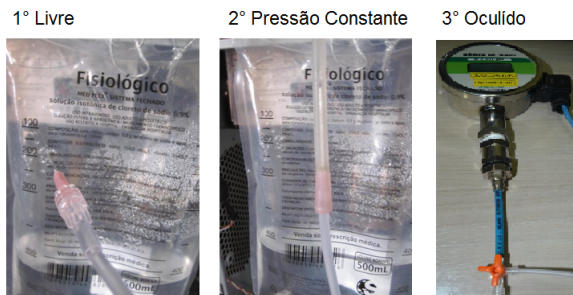


Figura 8. Tipos de ensaios para coleta de dados.

Os dados registrados foram coletados simultaneamente por dois tipos de sensores: (i) não invasivo, com leitura de tensão elétrica em Volts através do sensor de pressão da própria bomba de infusão; (ii) invasivo e com leitura da pressão no manômetro em PSI, com o sensor de pressão fora da bomba de infusão, sendo a leitura do manômetro adotado como o padrão de referência.

No ensaio de “Pressão Constante”, o escoamento do líquido tem que subir uma altura de coluna d’água de 5 metros, a qual corresponde a uma pressão de cerca de 370 mmHg. Tipicamente, a pressão máxima estabelecida pelos fabricantes de bombas de infusão são superiores a 600 mmHg [25]. Essa coluna d’água exige que o bombeamento de líquido vença algumas restrições, simulando características do corpo humano como, por exemplo, infusões arteriais ou epidural.

O objetivo de todas essas coletas é obter uma representação das principais situações vivenciadas em ambientes dos hospitais durante a entrega eletromecânica e automática de líquidos de infusão.

Para cada tipo de coleta foram feitos 29 experimentos independentes de aquisição dos dados. As coletas foram individuais com uso único do equipo, que foi substituído a cada novo experimento. Em todos os experimentos, foram coletadas informações dos sensores, gerando uma série temporal rotulada, onde, para cada série, é conhecido o tipo de ensaio e a situação do equipo ao longo do tempo: “Livre”, “Pressão Constante”, “Ocluído” e “Transição”.

Os três experimentos “Livre”, “Pressão Constante” e “Transição” tiveram uma duração total de uma hora e o experimento “Ocluído” teve uma duração de 30 minutos. No ensaio “Transição” a informação do sensor de pressão é coletada por um período de 30 minutos de infusão livre, após é feita a oclusão onde se coletam dados por mais 30 minutos. A transição foi realizada de forma manual.

O escoamento escolhido para todos os ensaios foi de um fluxo de 10 mL/h. Este fluxo é considerado um valor baixo de escoamento e, portanto, tende a levar um tempo maior para atingir pressões elevadas em uma situação de oclusão. Esse tipo de anomalia é a mais difícil de ser detectada pelas bombas de infusão [14]. Na Tabela I é mostrada a quantidade de dados coletados para cada tipo de ensaio.

Tabela I
COLETAS DE DADOS PARA CADA TIPO DE ENSAIO

Ensaio	Normal		Anormal	
	Livre	Constante	Transição	Ocluído
Tipo	Livre	Constante	Transição	Ocluído
Quantidade	29	29	29	29
Registro	2.149.090	2.118.066	2.239.200	1.318.132
Tempo Total	30h e 27m	29h e 51m	31h e 6m	18h e 50m

A coleta do experimento “Ocluído” possui o menor tempo total e registro de dados da infusão por atingir a pressão máxima da bomba de infusão no fluxo de análise em um intervalo de tempo inferior a 15 minutos. Desta forma, o tempo de infusão desse experimento foi limitado em 30 minutos na maioria das coletas.

B. Redes Bayesianas

A utilização de Redes Bayesianas envolve cálculos das probabilidades condicionais considerando que um evento tenha ocorrido. Na sua implementação, os eventos foram organizados em janelas de tempo durante o período total da infusão, sendo feito o deslocamento dessas janelas de tempo para a análise das hipóteses. Na Figura 9 é mostrado um exemplo de período de tempo (janela) definindo uma amostra para análise.

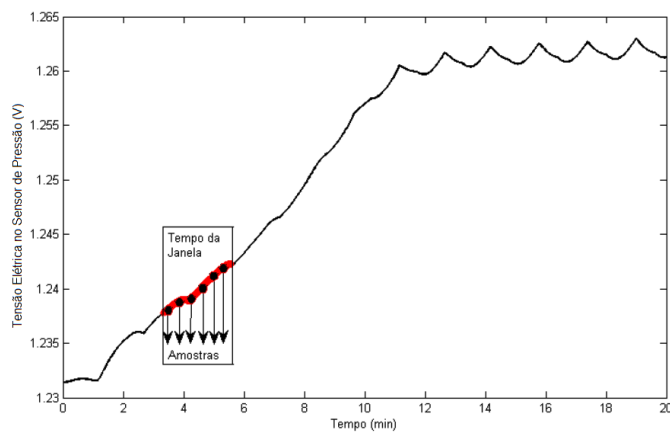


Figura 9. Exemplo de coleta da pressão de um ensaio ocluído

No emprego da Rede Bayesiana é necessário definir o valor da incerteza. Esse valor foi determinado através do cálculo do erro de leitura, sendo definido pela relação entre as leituras da pressão do sensor presente nas bombas de infusão (não invasivo) e as leituras do manômetro padrão (invasivo). Assim, foi possível definir a taxa de erro de sensor por [Volts/PSI], que foi estipulada através da escolha aleatória de nove ensaios da situação “Ocluído”. O resultado é a taxa de erro do sensor, que foi utilizado no treinamento da Rede Bayesiana.

Na tabela II são mostradas as execuções de 10 interações usadas na determinação da taxa, incluindo o erro do sensor e a precisão dos testes (quantidade de verdadeiros positivos mais os verdadeiros negativos, dividido pelo número de amostras do teste).

As escolhas aleatórias dos ensaios ocluídos que participaram deste experimento não alteraram de forma significativa a precisão e o cálculo da taxa de erro do sensor.

A variável de sinal de controle analisada é a taxa de acréscimo da pressão. Ela é obtida através da subtração do valor do ponto inicial pelo valor do ponto final acrescido de uma janela de tempo, dividido pelo tamanho da janela de tempo.

A Figura 10, apresenta os valores calculados da taxa da pressão ao longo do tempo, para uma janela de tempo de 180

Tabela II
DETERMINAÇÃO DO PERCENTUAL DA PRECISÃO E DO ERRO DO SENSOR E DO VALOR DA TAXA DE ERRO DO SENSOR

Teste	Precisão [%]	Erro do Sensor [%]	Taxa de erro do Sensor [Volts/PSI]
1	85.18	20.62	7.6
2	85.18	10.54	7.6
3	85.05	12.69	7.6
4	85.05	11.58	7.7
5	85.18	12.75	7.7
6	85.32	11.46	7.8
7	85.18	20.25	7.8
8	85.05	20.48	7.7
9	85.45	14.97	7.9
10	85.18	13.45	7.8

segundos, durante todo o intervalo de tempo das infusões. As taxas de acréscimo da pressão na Figura 10 registram o comportamento do sinal elétrico do sensor não invasivo nas quatro situações das infusões: “Livre”, “Pressão Constante”, “Transição” e “Ocluído”.

Também é possível analisar alguns aspectos do comportamento dos sinais elétricos obtidos pelo sensor não invasivo na Figura 10. Uma análise importante ocorre no intervalo de tempo [0 a 2] (evento inicial). Nesse caso, os valores obtidos para as taxas de acréscimo da pressão não representam as situações reais da pressão de bombeamento na linha de infusão. No evento inicial o valor obtido para a taxa de acréscimo da pressão do sinal “Livre” é o maior, indicando o comportamento errático. Nesse caso, a pressão existente não retrata acúmulo de líquido e sim acomodações físicas do próprio equipo, lembrando que na situação “Livre” não existe restrição ao bombeamento de líquido, logo, a pressão teria que ter um valor numérico abaixo da infusão “Ocluído”.

Desta forma, para identificar as situações “Normal” ou “Anormal” nos eventos próximos ao início da infusão, deve ser considerada uma probabilidade para essa hipótese quase nula. Porém, a partir do intervalo de tempo [2 a 4] (evento 2), tem-se valores da taxa de acréscimo da pressão que representam as realidades dos tipos de bombeamento de líquidos. De forma que, os valores da taxa de acréscimo da pressão permitem uma distinção das situações em que se encontra a infusão. Portanto, é possível aumentar gradualmente a probabilidade para identificações de anomalias para os próximos intervalos de eventos, de forma a gerenciar as hipóteses das situações da infusão.

Na Figura 11 é apresentado o fluxograma com a descrição da determinação de cada evento “n”, o qual relaciona as “xx” probabilidades “Normal” ou “Anormal”, com as “y” hipóteses.

Os intervalos de tempo percorridos da infusão foram considerados como pontos para determinar as probabilidades das hipóteses. O tamanho da janela de tempo foram os eventos considerados. Essas informações foram utilizadas na Rede Bayesianas para a detecção da oclusão. Na implementação desenvolvida nesse trabalho, foram testados seis eventos ou hipóteses diferentes, para um conjunto de dez probabilidades. Na Tabela III é mostrado o conjunto de probabilidades e

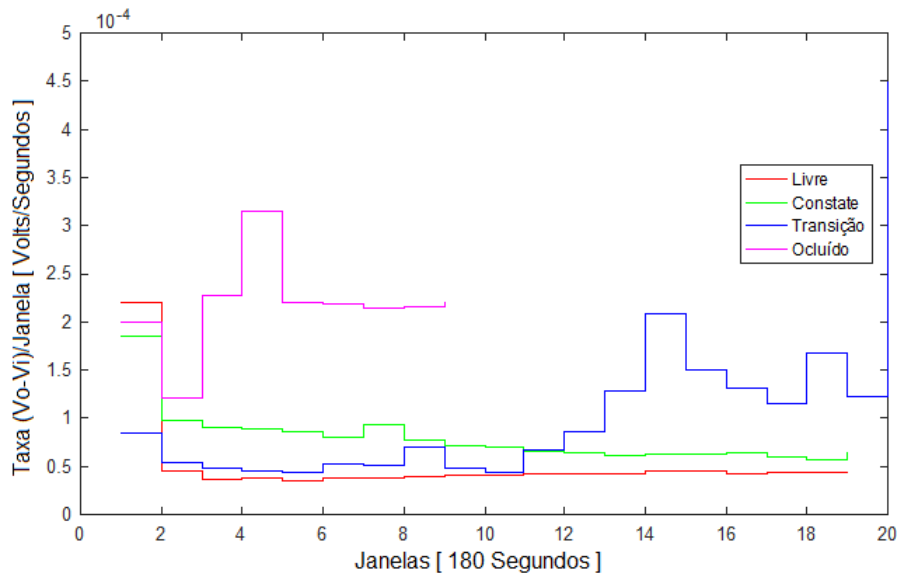


Figura 10. Cálculo da taxa de acréscimo da pressão em janela de tempo de 180 segundos.

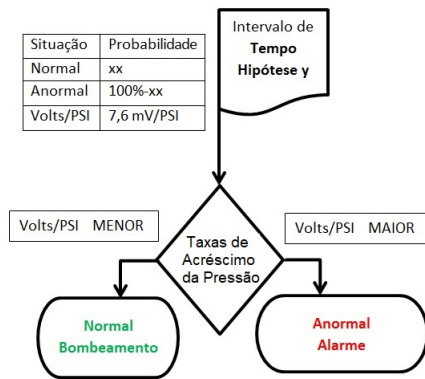


Figura 11. Determinação das relações das probabilidades condicionais por evento.

hipóteses avaliados.

Tabela III
DISTRIBUIÇÃO DAS PROBABILIDADES ANORMAL POR HIPÓTESES

H1 P %	H2 P %	H3 P %	H4 P %	H5 P %	H6 P %
05	10	15	20	30	50
05	20	30	40	50	60
05	30	40	70	80	90
10	20	30	40	50	60
10	30	50	70	80	90
10	40	60	80	90	95
20	50	60	80	90	99
30	50	60	80	90	99
35	60	80	90	95	99
40	70	85	95	97	99

Na obtenção do valor da taxa de acréscimo da pressão em Volts/Tempo, o tempo da janela temporal não poderá ultrapassar o tempo necessário para que seja atingida a máxima pressão de detecção. O fluxo analisado é de 10 mL/h e, nesse

caso, a cada 1 mL de infusão em situação de “Ocluído”, gera-se uma pressão aproximada de 12 PSI [25]. Essa pressão, portanto, é o indicativo de anormalidade. Assim, para o fluxo de 10 mL/h, são necessários seis minutos para atingir a pressão de 12 PSI.

Desta forma, na etapa de treinamento foi adotado um intervalo de tempo entre 1 e 4 minutos, com intervalos de passos de 30 segundos. Assim, a janela de tempo de 4 minutos em uma infusão, com fluxo de 10 mL/h totalmente ocluído, gera uma pressão máxima entorno de 8 PSI, abaixo da pressão que deverá ser interpretada para a detecção de oclusão na linha de infusão.

A determinação da situação de alarme é definida conforme as formulações abaixo. O cálculo da taxa de acréscimo da pressão (TAP) é definido como:

$$TAP = \frac{Volts}{Tempo}$$

Se a condição abaixo for atendida, então é realizado o cálculo das probabilidades:

$$TAP > 7,6 \times \frac{mV}{S}$$

O cálculo das probabilidades é definido como:

$$P(P_{Alarme}) = H_{Alarme}(x) \times Erro_{sensor\ Positivo}$$

$$P(P_{N\tilde{a}oAlarme}) = H_{N\tilde{a}oAlarme}(x) \times Erro_{sensor\ Negativo}$$

$$P(Alarme|N\tilde{a}oAlarme) = \frac{P_{Alarme}}{P_{Alarme} + P_{N\tilde{a}oAlarme}}$$

$$P(N\tilde{a}oAlarme|Alarme) = \frac{P_{N\tilde{a}oAlarme}}{P_{Alarme} + P_{N\tilde{a}oAlarme}}$$

Caso a probabilidade condicional de alarme,

$$P(Alarme|N\tilde{a}oAlarme)$$

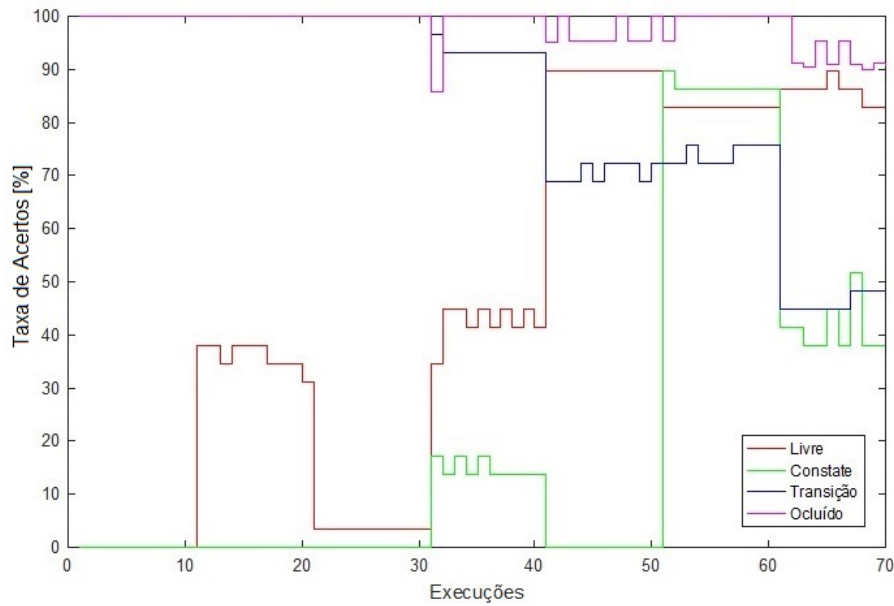


Figura 12. Evolução dos acertos com a variação dos conjuntos de probabilidades e tamanho da janela.

for maior que probabilidade condicional de não alarme,

$$P(P_{\text{N\~{a}o Alarme} | Alarme})$$

ent\~{a}o \u00e9 feita a indica\u00e7\~{a}o de situa\u00e7\~{a}o de alarme.

VI. AN\u00c1LISE DA PRECIS\u00c3O OBTIDA

Na etapa de treinamento, foram executadas 70 intera\u00e7\~{o}es, com objetivo de definir: (i) tamanho da janela temporal variando entre 1 e 4 minutos, com o passo de 30 segundos; (ii) o conjunto das 10 probabilidades testadas nas 6 hip\u00f3teses. Na Figura 12, \u00e9 apresentada a evolu\u00e7\~{a}o dos acertos ao longo de cada uma das intera\u00e7\~{o}es.

A combina\u00e7\~{a}o das probabilidades apresentadas na Tabela III, com as alternativas de dura\u00e7\~{a}o da janela temporal, que obteve a maior quantidade de identifica\u00e7\~{o}es corretas para todas as situa\u00e7\~{o}es em treinamento, \u00e9 apresentada na Tabela IV.

Tabela IV
CONJUNTO DE PROBABILIDADES E TAMANHO DA JANELA TEMPORAL PARA O MELHOR DESEMPENHO

Conjunto de Probabilidades						
Hip\u00f3tese	1	2	3	4	5	6
P Anormal	30 %	50 %	60 %	80 %	90 %	99 %
P Normal	70 %	50 %	40 %	20 %	10 %	01 %
Sensor N\u00e3o Invasivo						
Erro	20 %					
Janela Temporal						
Tempo	3 minutos e 30 Segundos					

Os resultados obtidos com a explora\u00e7\~{a}o de Redes Bayesianas na propostas BIRB atingiram uma precis\~{a}o de 85% de acerto nas identifica\u00e7\~{o}es dos estados: “Livre”; “Press\~{a}o Constante”; “Ocluido” e “Transi\u00e7\~{a}o” no conjunto de dados da etapa avalia\u00e7\~{a}o.

VII. CONCLUS\u00d5ES

Neste trabalho foram apresentadas discuss\~{o}es referentes ao emprego de t\u00e9cnicas de computa\u00e7\~{a}o aut\~{o}noma, atrav\u00e9s da utiliza\u00e7\~{a}o de Redes Bayesianas, para a detec\u00e7\~{a}o de oclus\~{a}o quando do escoamento de l\u00edquido em bombas de infus\~{a}o. O trabalho apresentou resultados que contribuem para redu\u00e7\~{a}o de falsos alertas em equipamentos eletrom\u00e9dicos intravenosos (bombas de infus\~{a}o), com perspectiva de atender as recomenda\u00e7\~{o}es de \u00f3rg\~{a}os da \u00e1rea medica [15].

De modo mais espec\u00edfico, a contribui\u00e7\~{a}o central deste trabalho \u00e9 a explora\u00e7\~{a}o de Redes Bayesianas no problema de gerenciamento de alertas em bombas de infus\~{a}o. Os resultados obtidos apontam que as Redes Bayesianas podem contribuir para reduzir a quantidade de falsos positivos e negativos em bombas de infus\~{a}o, sem comprometer o tempo de detec\u00e7\~{a}o, em particular em situa\u00e7\~{o}es de opera\u00e7\~{a}o com volumetrias baixas.

Adicionalmente, o trabalho contribui com uma sistematiza\u00e7\~{a}o de conceitos relacionados a \u00e1rea de infus\~{a}o intravenosa, bem como com a caracteriza\u00e7\~{a}o dos principais erros que ocorrem no principal tipo de equipamento desta \u00e1rea, que s\~{a}o as bombas de infus\~{a}o.

Um aspecto promissor para ado\u00e7\~{a}o da proposta BIRB \u00e9 o fato das normas atuais relacionadas aos equipamentos eletrom\u00e9dicos [33] estimularem a inclu\u00e7\~{a}o de t\u00e9cnicas inovadoras para equipamentos eletrom\u00e9dicos, desde que seja comprovada sua viabilidade t\u00e9cnica.

Considerando a literatura da \u00e1rea [15] a proposta BIRB teve um desempenho promissor, atingindo uma precis\~{a}o de 85%. As Redes Bayesianas, por sua vez, como t\u00eam por base matem\u00e1tica c\u00e1lculos probabil\u00edsticos, apresentam potencial de serem implementadas em sistemas computacionais de diferentes portes.

Dentre os possíveis trabalhos futuros, destaca-se a avaliação da precisão da proposta BIRB considerando o emprego de conjuntos de dados que contemplem outras taxas de infusão. Também está prevista a realização de novas avaliações considerando as características operacionais de outros tipos de Bomba de Infusão de largo uso no mercado.

VIII. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a empresa LIFEMED S.A., localizada na cidade de Pelotas/RS. A mesma cedeu Bombas de Infusão e seus acessórios para estudos e testes da equipe de pesquisa.

Também gostaríamos de agradecer aos órgãos de fomento FAPERGS e CNPq pelo suporte parcial aos trabalhos desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

- [1] M. K. Bhavasaar, M. Nithya, R. Praveena, N. Bhuvanewari, and T. Kalaiselvi, "Automated intravenous fluid monitoring and alerting system," in *2016 IEEE Technological Innovations in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR)*, no. Tiar. Chennai, India: IEEE, jul 2016, pp. 77–80. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7801217/>
- [2] A. Blandford, D. Furniss, I. Lyons, G. Chumbley, I. Iacovides, L. Wei, A. Cox, A. Mayer, K. Schnock, D. W. Bates, P. C. Dykes, H. Bell, and B. D. Franklin, "Exploring the Current Landscape of Intravenous Infusion Practices and Errors (ECLIPSE): protocol for a mixed-methods observational study." *BMJ Open*, vol. 6, no. 3, p. e009777, mar 2016.
- [3] D. O. Canelas, A. H. Hermini, and A. Cliquet Jr, "Metodologia para avaliação de desempenho essencial de bombas de infusão," *Metrologia*, 2003.
- [4] M. G. Vicente, "Vigilância pós-comercialização de produtos para a saúde: A tecnovigilância como uma prática de saúde pública," *Boletim Informativo de Tecnovigilância, Brasília*, no. 3, 2012.
- [5] R. P. Freire, C. Pitassi, A. A. Gonçalves, and D. Schout, "Gestão de equipamentos médicos: o papel das práticas de qualidade em um hospital de excelência brasileiro," *Rev. Adm. Hosp. e Inovação em Saúde*, vol. 8, no. 8, pp. 28–41, jun 2012.
- [6] A. C. Bridi, T. Q. Louro, and R. C. L. da Silva, "Clinical Alarms in intensive care: implications of alarm fatigue for the safety of patients," *Rev. Lat. Am. Enfermagem*, vol. 22, no. 6, pp. 1034–1040, dec 2014.
- [7] G. Lee, D. Howard, and D. Slezak, *Convergence and Hybrid Information Technology. Communications in Computer and Information Science*, 2011.
- [8] M. Imhoff and S. Kuhls, "Alarm Algorithms in Critical Care Monitoring," *Anesth. Analg.*, vol. 102, no. 5, pp. 1525–1537, may 2006.
- [9] L. SOUZA *et al.*, "Introdução à circulação extracorpórea," *Fundamentos da Circulação Extracorpórea*, vol. 1, pp. 33–50.
- [10] A. Fernandes das Chagas, "Avanço Tecnológico e Sistema de Saúde: Os Grandes Avanços e as Preocupações Decorrentes dos Equipamentos Eletromédicos." *Acta Ciências e Saúde*, vol. 01, no. 5, pp. 25–29, fev 2016.
- [11] D. G. Mason, J. Bancroft, and J. F. Fraser, "Adaptive multi-infusion decision support for the multivariable circulatory management of critically ill patients," in *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. IEEE*, ago 2010, pp. 426–429.
- [12] R. A. Z. AMORIM; BARBOSA, "Análise do Desempenho de Infusões Múltiplas," *X Encontro Lat. Am. Iniciação Científica e VI Encontro Lat. Am. Pós-Graduação – Univ. do Val. do Paraíba*, pp. 564–567, 2011.
- [13] H. D. C. D. BRASIL, "Centro cirúrgico," Brasília, Brasil, 2017, online; Acesso 20 Junho 2017. [Online]. Available: <http://www.hcbr.com.br/centro-cirurgico.php>
- [14] P. T. Lee, F. Thompson, and H. Thimbleby, "Analysis of infusion pump error logs and their significance for health care." *Br. J. Nurs.*, vol. 21, no. 8, pp. S12, S14, S16–20, may 2012.
- [15] I. ECRI, "Top 10 Health Technology Hazards for Top 10 Health Technology Hazards for 2017," ECRI Institute Patient Safety Organization, Massachusetts, USA, Massachusetts, USA, Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: https://www.ecri.org/Resources/Whitepapers/{_}and{_}reports/Haz17.pdf
- [16] N. P. S. A. NHS, "Infusion Device Solutions," National Health Service, England, UK, England, UK, Tech. Rep., 2017.
- [17] M. Petagna and H. Tanaka, "Identificação das causas de falha em bombas de infusão no ambiente hospitalar," *XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*, pp. 1849–1852, oct 2014.
- [18] J. M. Rothschild, C. A. Keohane, E. F. Cook, E. J. Orav, E. Burdick, S. Thompson, J. Hayes, and D. W. Bates, "A controlled trial of smart infusion pumps to improve medication safety in critically ill patients*," *Crit. Care Med.*, vol. 33, no. 3, pp. 533–540, mar 2005.
- [19] E. Kurnat-Thoma and K. Shah, "A Community Hospital's Evaluation of Alarm Management Safety Factors." *J. Nurs. Adm.*, vol. 46, no. 12, pp. 675–682, dec 2016.
- [20] N. Paul Pelletier and A. Fisher, "Infusion Pump in UH60L/M Flight in Afghanistan: Why Failures Occur," *Air Med. J.*, pp. 1–10, mai 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.amj.2017.04.007>
- [21] D. Heise, J. Rathgeber, and D. Kettler, "Fehlerquellen und Gefahren beim Einsatz von Motorspritzenpumpen," *Anaesthesist*, vol. 47, no. 1, pp. 54–58, jan 1998. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s001010050523>
- [22] F. E. Block, L. Nuutinen, and B. Ballast, "Optimization of alarms: a study on alarm limits, alarm sounds, and false alarms, intended to reduce annoyance." *J. Clin. Monit. Comput.*, vol. 15, no. 2, pp. 75–83, feb 1999.
- [23] J. Amooore and L. Adamson, "Infusion devices: characteristics, limitations and risk management," *Nurs. Stand.*, vol. 17, no. 28, pp. 45–52, mar 2003.
- [24] L. R. Holsbach, F. Kliemann, and N. Holsbach, "Utilização do instrumento de identificação de conhecimentos para administração segura de medicamentos com o uso de infusão automática," *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, vol. 29, no. 4, pp. 353–362, 2013.
- [25] F. Neitzke, A. De souza Júnior, and E. Costa Da Motta, "Comparison of Two Sensors for Pressure Monitoring and Occlusion Detection in Infusion Pumps," *Simpósio Bras. Automação Intel.*, p. 6, oct 2017.
- [26] J. C. Hernández and P. G. Vidal, "Guidelines for protection against electric shock in pv generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 1, pp. 274–282, 2009.
- [27] A. E. Margotti, X. Daniel, F. Pezzolla, F. Assis, and P. Avelar, *Diretrizes Metodológicas - Elaboração de Estudos para Avaliação de Equipamentos Médico-Assistenciais*, T. e. I. E. D. d. C. e. T. Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Ciência, Ed. Brasília, Brasil: Ministério da Saúde, 2013. [Online]. Available: <http://www.saude.gov.br>
- [28] A. Silveira Silva, B. Ferreira Leite, D. Gabriele Alves Silveira, F. de Oliveira Laranjeira, G. Vilela de Brito, J. Souza Vidal, K. Miranda Souza, M. Tolentino Silva, and M. Gonçalves de Freitas, *Diretrizes metodológicas : elaboração de pareceres técnico-científicos / Ministério da Saúde, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos, Departamento de Ciência e Tecnologia. - 4. ed.*, T. e. I. E. D. d. C. e. T. Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Ciência, Ed. Brasília, Brasil: Ministério da Saúde, 2014, no. 1. [Online]. Available: www.saude.gov.br
- [29] M. Forfang, L. Hoff, N. Bérard-Andersen, G. Olsen, and K. Brabrand, "A Combined Bayesian Approach to Classifying Venous Flow during Contrast-Agent Injection using Doppler Ultrasound," *14th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics*, pp. 501–504, 2008. [Online]. Available: <http://www.springerlink.com/index/J184477666W01472.pdf>
- [30] L. S. C. De Oliveira, "Redes bayesianas dinâmicas com definição de limiar aplicadas ao estudo de caso detecção de extrassístole ventricular," Ph.D. dissertation, Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.
- [31] P. Kaewprag, C. Newton, B. Vermillion, S. Hyun, K. Huang, and R. Machiraju, "Predictive models for pressure ulcers from intensive care unit electronic health records using Bayesian networks," *BMC Medical Informatics and Decision Making*, vol. 17, no. S2, p. 65, jul 2017. [Online]. Available: <http://bmcmedinformdecismak.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12911-017-0471-z>
- [32] L. Industrial, "Lifemed - tecnologia a serviço da vida," <http://www.lifemed.com.br/produto/lf-smart>, mar 2018, (Acesso em: 07/01/2018).
- [33] A. B. d. Normas Técnicas, "NBR IEC 60601-1-8:2014 - Equipamento eletromédico - Parte 1-8: Requisitos gerais para segurança básica e desempenho essencial- Norma colateral: Requisitos gerais, ensaios e diretrizes para sistemas de alarme em equipamentos eletromédicos e sistemas eletromédicos," *ABNT*, nov 2014.