

Análise estatística de consequência de cenários hipotéticos de acidentes com vazamento do gás cloro obtidos por simulação utilizando o *software* ALOHA®

Statistical analysis of the result of hypothetical accident scenarios with leakage of chlorine gas obtained by simulation using the software ALOHA®

Toni Jefferson Lopes

Universidade Federal do Rio Grande – FURG – Santo Antônio da Patrulha – RS
tjlopes@furg.br

Nara Lúcia dos Santos

Universidade Federal do Rio Grande – FURG – Santo Antônio da Patrulha – RS
n.santos@furg.br

Afonso Henrique da Silva Júnior

Universidade Federal do Rio Grande – FURG – Santo Antônio da Patrulha – RS
afonsojunior@furg.br

Adriano da Silva Correio

Universidade Federal do Rio Grande – FURG – Santo Antônio da Patrulha – RS
adrianosilva@furg.br

Resumo: Os acidentes envolvendo indústrias químicas podem apresentar um grande risco para os trabalhadores e para a comunidade, uma vez que estes são expostos ao contato direto com produtos tóxicos, podendo causar desde intoxicações leves até a morte. A análise do comportamento destes compostos durante um vazamento pode auxiliar na prevenção de possíveis acidentes, através da elaboração de planos de ação emergencial. Neste trabalho foi realizado um estudo do comportamento do gás cloro, durante um vazamento acidental, utilizando o *software* ALOHA 5.4.4® para a modelagem da dispersão atmosférica da nuvem durante o vazamento, o qual foi analisado estatisticamente a fim de se obter as variáveis de maior influência. Para tanto, oito fatores foram considerados, (A) Velocidade do vento, (B) Umidade relativa do ar, (C) Temperatura, (D) Dimensões do tanque, (E) Percentual do agente químico no tanque, (F) Diâmetro do orifício de vazamento, (G) Altura do orifício no tanque e (H) Condições climáticas. Com base na análise estatística foi possível verificar que as variáveis E, F e G contribuíram com o aumento no volume de substância liberada e no aumento da área de alcance da substância. Portanto, os resultados obtidos podem auxiliar na identificação de possíveis riscos e na execução de planos de ação emergencial, estimando os cenários mais críticos durante um possível vazamento acidental de substâncias tóxicas.

Palavras-chave: segurança do trabalho; impacto ambiental; segurança ocupacional; ferramentas para planos de contingência.

Abstract: Accidents involving chemical industries may present a great risk to workers and the community, since they are exposed to direct contact with toxic products, may cause from mild poisoning to death. Behavior analysis of these compounds during a leak can help prevent possible accidents, through the development of emergency action plans. In this paper a study was conducted of chlorine gas behavior during an accidental leak, using the ALOHA[®] software version 5.4.4 for modeling atmospheric dispersion cloud during casting, which was statistically analyzed to obtain the most influential variables. Therefore, eight factors were considered, (A) Wind speed, (B) Relative humidity, (C) Temperature, (D) Tank dimensions, (E) Percentage of chemical agent in the tank, (F) Diameter of the pouring orifice, (G) Height of the orifice in the tank and (H) Climate conditions. Based on the statistical analysis it was observed that the variables E, F and G contributed to the increase in the volume of substance released and the increase in the substance range. Therefore, the results may assist in identifying possible risks and the implementation of emergency action plans, estimating the most critical scenarios for a possible accidental leak of toxic substances.

Key words: safety; environmental impact; occupational safety; tools for contingency plans.

1 Introdução

O crescimento das atividades de produção, armazenamento e transporte de substâncias químicas a nível global provocou um aumento no número de indivíduos expostos a acidentes químicos. Paralelamente, também é possível observar aumento na frequência e na gravidade desses acidentes [1]. Em dezembro de 2014, relembrou-se em todo o mundo, os trinta anos daquele que se tornou o pior acidente industrial envolvendo substâncias químicas. Na madrugada entre dois e três de dezembro de 1984, 40 toneladas de gases letais vazaram da fábrica de pesticidas da *Union Carbide Corporation*, em Bhopal, Índia. Foi o maior desastre químico da história. Gases tóxicos como o isocianato de metila e o hidrocianeto vazaram de um tanque durante operações de rotina. Os dispositivos de segurança que deveriam evitar desastres como esse apresentavam problemas ou estavam desligados. O acidente provocou a morte de 8 mil pessoas nos três dias subsequentes ao acidente e estima-se que aproximadamente 20 mil pessoas já tenham morrido com problemas decorrentes do acidente [2]. Desde então pouco tem sido feito para evitar desastres como o que ocorreu na Índia, recentemente, no Brasil, um acidente envolvendo a indústria petroquímica Braskem em Maceió (Alagoas), também provocou a intoxicação de trabalhadores e de centenas de pessoas residentes na vizinhança da indústria. O vazamento ocorreu devido a um aumento da pressão no equipamento de pré-resfriamento, provocando o rompimento e vazamento de gás cloro. Muitas pessoas em toda a área começaram a sentir os efeitos do gás, sendo que cerca de 130 pessoas deram entrada no hospital com sintomas de intoxicação respiratória, das quais muitas eram crianças e idosos [3].

Os dois acidentes descritos acima se assemelham por ocorrerem em regiões com extensa população nos arredores da indústria, resultando numa grande vulnerabilidade social e, conseqüentemente, na intoxicação e morte num único evento, como no caso de Bhopal na Índia. A gravidade dos efeitos causados descreve os riscos associados ao armazenamento de substâncias tóxicas, que muitas vezes passa a ser potencializado pela falta de manutenção e acompanhamento dos riscos.

No caso relatado em Maceió, a população foi exposta ao gás cloro, o qual apresenta

alta toxicidade podendo ocasionar sérios danos irreversíveis ao ser humano e ao ambiente atingido. Mesmo em baixa concentração a presença de cloro no ar é imediatamente sentida devido ao odor irritante e penetrante, causando irritação no nariz e garganta, tosse e dificuldades respiratórias [4].

Assim, para orientar indústrias que utilizam o gás cloro nas operações unitárias de seus processos, a Norma Regulamentadora 15 (NR 15), anexo 11, estabelece um limite máximo de exposição para pessoas envolvidas no manuseio de 0,8 ppm para até 48 horas de exposição semanais, considerando ainda o grau máximo de insalubridade [5]. A exposição ao ar contaminado com cerca de 40 a 60 ppm de cloro, durante cerca de 30 a 60 minutos também pode ter graves consequências, e a inalação de ar contaminado com cerca de 1000 ppm de cloro é fatal [6].

Portanto, estudos de análise de consequência da dispersão de gás cloro na forma de nuvens são de grande importância, pois permite a modelagem do comportamento da dispersão identificando áreas de maior risco [7]. Em geral, o tamanho da zona de dissipação depende da quantidade de material liberado, da densidade, da volatilidade e das condições atmosféricas. Desta maneira além da influência da taxa de liberação, devem-se considerar as condições e parâmetros atmosféricos relevantes para a dissipação das nuvens de vapor tóxico, como direção do vento, umidade do ar, entre outros [8].

Algumas ferramentas computacionais podem auxiliar no estudo do comportamento da dispersão atmosférica de gases de contaminantes químicos e na determinação dos cenários mais críticos. O *software* ALOHA[®] (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres*), desenvolvido pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), auxilia no planejamento e treinamento em situações de emergência, com capacidade para estimar a distância a que uma dada concentração de interesse pode atingir em função do cenário acidental, além de estimar a radiação térmica nos casos de incêndio e explosões [9]. Porém, entre as diferentes situações nas quais pode ocorrer um vazamento é difícil de concluir quais fatores terão maior importância nas dispersões, com isso é necessário o uso de outra ferramenta que determine estatisticamente quais situações serão mais severas.

Na literatura são encontrados diversos trabalhos que utilizam o *software* ALOHA[®], por exemplo: Shao e Duan [10] simularam possíveis cenários de acidentes com vazamento de gás natural e o impacto sobre moradores do entorno. Tseng e Kuo [11] estudaram a liberação de substâncias tóxicas no estado líquido e gasoso de cloro, epiclorohídria, e foscênio em um complexo químico. Lopes et al. [12] analisaram os riscos envolvendo cenários hipotéticos de vazamento de amônia nas instalações de refrigeração de um frigorífico.

Para tanto, este trabalho objetiva o estudo de diferentes cenários de vazamento do gás cloro utilizando um *software* de simulação, e a determinação estatística dos fatores que podem potencializar cenários mais críticos.

2 Metodologia

2.1 Metodologia usada pelo *software* ALOHA[®] para modelagem das nuvens de dispersão atmosférica

A análise dos possíveis cenários de vazamento foi realizada com o auxílio do *software* ALOHA[®], desenvolvido pela Agência Americana de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*Environmental Protection Agency - EPA*). O ALOHA é uma ferramenta de mensuração das propriedades de dispersão, explosão ou inflamabilidade de um produto químico, o qual

analisa o impacto de substâncias químicas durante vazamentos para a atmosfera, possibilitando a modelagem matemática de nuvens a partir do modelo de dispersão Gaussiana para prever como os gases, que são mais dinâmicos do que ar, se dispersam na atmosfera. Este modelo é descrito na Equação 1.

$$C(x, y, z, t) = \begin{cases} \frac{\chi}{2} \left[erf \left(\frac{x}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) - erf \left(\frac{x-U_t}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) \right] & (t \leq t_r) \\ \frac{\chi}{2} \left[erf \left(\frac{x-U(t-t_r)}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) - erf \left(\frac{x-U_t}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) \right] & (t_r < t < \infty) \end{cases} \quad (1)$$

Onde: x, y e z são parâmetros de dispersão; t_r é o tempo de duração do vazamento; U variável relacionada com o vento.

O termo χ representa uma distribuição de Gauss a partir de uma fonte pontual bem conhecida e em estado estacionário, visto na Equação 2 [13].

$$\chi(x, y, z, t) = \left(\frac{Q(t)}{U} \right) g_y(x, y) g_z(x, z) \quad (2)$$

Sendo g_y calculado pela Equação 3.

$$g_y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y(x)} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Sendo g_z é calculado pela Equação 4.

$$g_z(x, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z(x)} \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-h_s}{\sigma_z(x)} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+h_s}{\sigma_z(x)} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

Onde h_s é a altura do lançamento.

Segundo este modelo, o vento e as turbulências atmosféricas são as forças que movem as moléculas de um gás liberado no ar, assim quando uma nuvem de escape encontra o ar em movimento ocorre uma "mistura turbulenta", que a faz se espalhar para cima e na direção do vento.

2.2 Caracterização das instalações de cloro

A região metropolitana de Porto Alegre (RS) foi escolhida para tal estudo, localizada a aproximadamente 187 m acima do nível do mar. Foram consideradas as condições atmosféricas médias para o mês de Abril de 2015, como velocidade do vento e umidade do ar, além da temperatura e intensidade da radiação térmica. Os dados foram coletados através de endereço eletrônico na internet, no site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) [14]. A classe de estabilidade atmosférica, parâmetro fundamental de medida da capacidade dispersiva da atmosfera foi considerada neutra (D), situação estimada baseado no método de Pasquill que utiliza dados de radiação solar e velocidade do vento. No instante do possível vazamento, um tanque de aço carbono armazena cloro liquefeito sobre o efeito de 6 atm de pressão, o qual está localizado junto ao solo da indústria ao ar livre cercada por habitações e pouca vegetação.

2.3 Planejamento experimental para os cenários de vazamento

Técnicas de planejamento experimental foram utilizadas para estudar um conjunto de possíveis cenários de vazamento, com o objetivo de determinar quais variáveis apresentam maior influência na dispersão do poluente, atribuindo valores a estas de modo a minimizar a variabilidade. A utilização das técnicas de planejamento experimental apesar de reduzir significativamente o número de ensaios não afetava qualidade das informações, analisando simultaneamente as variáveis envolvidas considerando seus efeitos e representando o processo estudado através de expressões matemáticas [15]. Com a finalidade de analisar a influência de alguns parâmetros no estudo de vazamento do gás cloro foi adotado o uso do planejamento experimental fatorial com o auxílio do *software* Statistica 8.0[®], no qual foram consideradas as seguintes variáveis: (A) Velocidade do vento, (B) Umidade relativa do ar, (C) Temperatura, (D) Dimensões do tanque, (E) Percentual do agente químico no tanque, (F) Diâmetro do orifício de vazamento, (G) Altura do orifício no tanque e (H) Condições climáticas, os quais são listados na Tabela 1 juntamente com seus respectivos níveis de variação.

Tabela 1. Fatores e níveis adotados para o planejamento experimental

FATORES	-1	+1
(A) Velocidade do vento (m/s)	15	25
(B) Umidade relativa do ar (%)	40	70
(C) Temperatura (°C)	15	30
(D) Razão dimensões do tanque de armazenamento (Diâmetro/Comprimento) (m/m)	2/5	6/15
(E) Percentual do agente químico no tanque (%)	30	70
(F) Diâmetro do orifício de vazamento (m)	0,001	0,005
(G) Altura do orifício de vazamento no tanque (m)	0,5	1,5
(H) Condições climáticas	Limpo	Parcialmente nublado

*(-1) e (+1) são os níveis de variação dos fatores

3 Resultados e discussão

Os resultados obtidos para a modelagem das nuvens de dispersão atmosférica, durante vazamento de gás cloro, são apresentados graficamente pelo *software* ALOHA[®], os quais são classificados em áreas na forma de linhas referenciais de concentração (ppm) de acordo com o nível de exposição aguda e a distância referente, como segue na Figura 1.

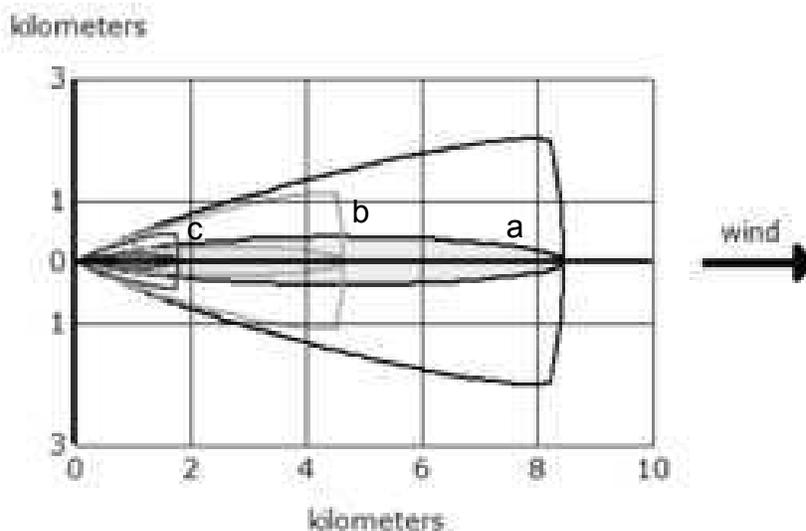


Figura 1. Linhas referenciais de concentração

Os níveis de exposição aguda – *Acute Exposure Guideline Levels* (AEGl) são indicadores de níveis tóxicos de preocupação desenvolvidos pela agência Americana EPA, para prever a área onde a concentração de gases tóxicos pode ser alta o suficiente para provocar danos à saúde humana. Os indicadores recebem a seguinte classificação:

a:AEGl-1, corresponde ao tempo de exposição de 60 minutos a uma concentração de 0.5 ppm. Acima desta concentração se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos susceptíveis, pode experimentar irritação, sem que haja efeitos mais severos ou irreversíveis em longo prazo.

b:AEGl-2, corresponde ao tempo de exposição de 60 minutos para uma concentração de 2ppm. Acima desta concentração se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos susceptíveis, pode experimentar efeitos sérios em longo prazo ou irreversíveis com o impedimento da sua capacidade de fuga.

c:AEGl-3, corresponde ao tempo de exposição de 60 minutos para uma concentração de 20 ppm. Acima desta concentração se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos susceptíveis pode experimentar efeitos ameaçadores para a vida.

3.1 Análise estatística dos resultados

Os resultados obtidos para os cenários de vazamento através do *software* ALOHA[®], foram tratados estatisticamente considerando apenas o nível de exposição AEGl 3 por apresentar maior concentração quando comparado com os outros níveis, e conseqüentemente apontar maior risco para a saúde. O Quadro 1 apresenta a matriz experimental usada para obtenção dos cenários de vazamento do gás cloro, juntamente com as respectivas respostas para o comprimento e a largura máxima atingida pela pluma de substância, no qual são destacados os cenários 21 e 29 por atingirem maior área e conseqüentemente apresentar maior risco.

Quadro 1. Matriz do Planejamento Experimental.

Cenários	Fatores								Resposta	
	A	B	C	D	E	F	G	H	AEGL 3 (comprimento)	AEGL 3 (largura)
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	181	12
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	102	4,94
3	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	88	7,41
4	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	93	7,41
5	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	425	37
6	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	28	1,85
7	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	36	2,47
8	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	326	25
9	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	29	1,23
10	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	285	12
11	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	371	25
12	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	22	1,85
13	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	110	7,41
14	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	107	7,41
15	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	139	9,09
16	1	1	1	1	-1	1	1	-1	85	4,94
17	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	121	9,09
18	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	284	15
19	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	370	25
20	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	94	7,41
21	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	912	49
22	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	107	7,41
23	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	288	12
24	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	701	49
25	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	250	12
26	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	613	25
27	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	799	49
28	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	94	4,94
29	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	912	49
30	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	108	7,41
31	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	290	12
32	1	1	1	1	1	1	1	1	701	25

Os cenários 21 e 29 (Quadro 1) apresentavam no momento do vazamento 70% de produto no tanque, o orifício por onde ocorreu o vazamento foi o menor analisado 0,005 m e a velocidade do vento de 15 m/s para os dois casos. De acordo com Zhao e Liu [16], a menor velocidade do vento tende a formar uma maior concentração da substância inicialmente até atingir a mesma velocidade do vento com aumento gradual durante o tempo.

3.1.1 Análise estatística dos resultados obtidos para o comprimento da nuvem de dispersão do gás cloro

A Tabela 2 apresenta os resultados para a análise estatística do comprimento da nuvem de dispersão atmosférica, com base no modelo sem interações, considerando o nível de exposição máxima com concentração de 20 ppm (AEGL 3). Utilizando um nível de confiança de 95%, as variáveis E, F e G são estatisticamente significativas para a dispersão do gás cloro, por apresentarem valores de p, menores que 5%, valor adotado na análise. Em relação à análise do sinal algébrico dos efeitos, a variável E apresenta sinal positivo indicando que quanto maior volume de cloro no tanque maior será o alcance da nuvem de gás tóxico. A variável F também apresenta sinal positivo indicando que quanto maior o orifício de vazamento

maior o comprimento da nuvem tóxica. No que diz respeito à variável G, esta apresenta comportamento inversamente proporcional à resposta, indicando que o vazamento localizado na parte inferior do tanque contribui para maior alcance da nuvem de dispersão atmosférica.

Tabela 2. Efeitos e índices estatísticos em relação à resposta AEGL 3

	Efeito	Desvio Padrão	Teste t de Student	Nível p	Limite de confiança	
					-95%	95%
Média/Interações	283,469	27,245	10,404	0,000	227,108	339,829
(A) Velocidade do vento	-98,188	54,490	-1,802	0,085	-210,909	14,534
(B) Umidade relativa do ar	-4,813	54,490	-0,088	0,930	-117,534	107,909
(C) Temperatura	92,438	54,490	1,696	0,103	-20,284	205,159
(D) Dimensões do tanque	47,438	54,490	0,870	0,393	-65,284	160,159
(E) Percentual de agente químico no tanque	263,563	54,490	4,837	0,000	150,841	376,284
(F) Diâmetro do orifício de vazamento	318,563	54,490	5,846	0,000	205,841	431,284
(G) Altura do orifício	-128,686	54,490	-236,165	0,027	-241,409	-159,656
(H) Condições climáticas	7,062	54,490	0,130	0,898	-105,659	119,784

O gráfico de Pareto, Figura 2, apresenta os fatores mais significativos ao nível de confiança adotado, sobre a resposta comprimento da nuvem de dispersão atmosférica, indicando que as variáveis: (E) Percentual de agente químico no tanque, (F) Diâmetro do orifício de vazamento e (G) Altura do orifício no tanque apresentam maior significância em relação às outras variáveis.

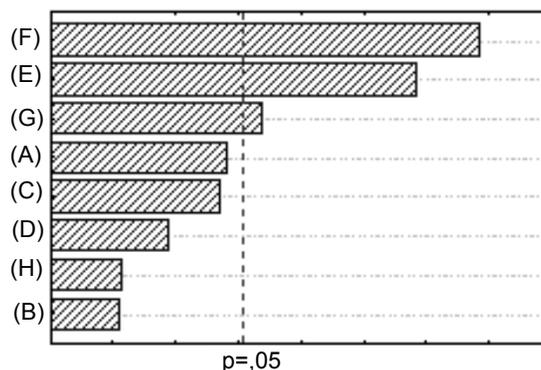


Figura 2. Gráfico de Pareto das variáveis

A Figura 3 mostra as curvas de nível para o modelo considerando o nível máximo de exposição 3 (AEGL 3), para as variáveis E e F indicando que o Percentual do agente químico (E) no tanque contribui para o comprimento da nuvem tóxica, quando o volume da substância ocupa entre 58 e 74% (níveis 0,4 a 1,2), da capacidade do tanque.

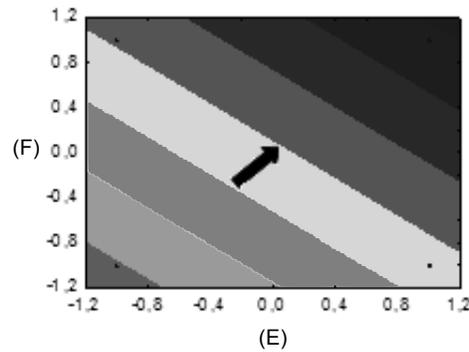


Figura 3. Curva de nível das variáveis F vs E

A Figura 4 mostra o gráfico de curva de nível para as variáveis E e G, o qual atribui a Altura do vazamento (G) ao maior alcance da nuvem quando esta se encontra entre 0,4 a 0,8 m (-1,2 a -0,4).

A Figura 5 apresenta as curvas de níveis para as variáveis F e G indicando que a região com Diâmetro do orifício de vazamento (F) entre 0,0038 a 0,0054 m (níveis 0,4 a 1,2), favorece o alcance máximo para o comprimento da nuvem de dispersão atmosférica.

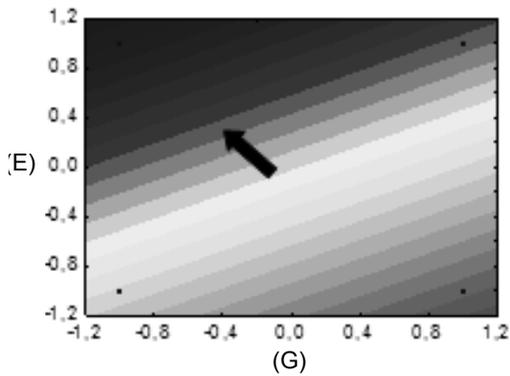


Figura 4. Curva de nível das variáveis E vs G

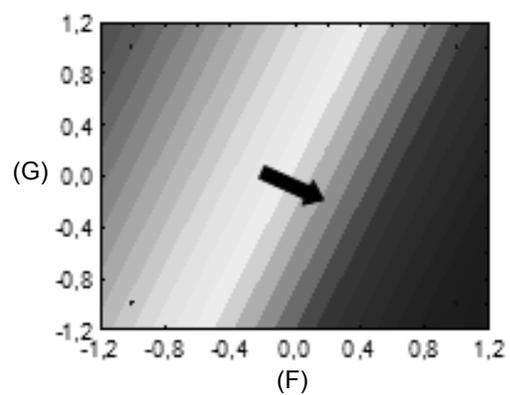


Figura 5. Curva de nível das variáveis G vs F

3.1.2 Análise estatística dos resultados obtidos para a largura da nuvem de dispersão do gás cloro

A Tabela 3 apresenta o resultado para a análise da largura da nuvem de dispersão atmosférica, com base no modelo sem interação, considerando o nível de exposição máxima com concentração de 20 ppm (AEGL 3). Utilizando um nível de confiança de 95%, as variáveis A, E, F e G são estatisticamente significativas para a dispersão do gás cloro, por apresentarem valores de p, menores que 5%, valor adotado na análise. Em relação à análise do sinal algébrico dos efeitos, a variável E apresenta sinal positivo indicando que quanto

maior volume de cloro no tanque maior será a largura da nuvem de gás tóxico. A variável F também apresenta sinal positivo indicando que quanto maior o orifício de vazamento maior largura da nuvem tóxica. No que diz respeito as variáveis A e G estas apresentam comportamento inversamente proporcional à resposta, indicando que o vazamento localizado na parte inferior do tanque e uma menor velocidade do vento contribui para maior largura da nuvem de dispersão atmosférica.

Tabela 3. Efeitos e índices estatísticos em relação à resposta AEGL 3

	Efeito	Desvio Padrão	Teste t de Student	Nível p	Limite de confiança	
					-95%	95%
Média/Interações	16,414	1,538	10,667	0,000	13,231	19,597
(A) Velocidade do vento	-7,008	3,077	-2,277	0,032	-13,374	-0,642
(B) Umidade relativa do ar	0,610	3,077	0,198	0,844	-5,755	6,976
(C) Temperatura	5,419	3,077	1,761	0,091	-0,946	11,785
(D) Dimensões do tanque	-1,169	3,077	-0,379	0,707	-7,535	5,196
(E) Percentual de agente químico no tanque	11,953	3,077	3,884	0,001	5,587	18,319
(F) Diâmetro do orifício de vazamento	18,383	3,077	5,973	0,000	12,017	24,749
(G) Altura do orifício	-10,023	3,077	-3,257	0,003	-16,389	-3,657
(H) Condições climáticas	-1,716	3,077	-0,557	0,582	-8,082	4,649

O gráfico de Pareto, Figura 6, apresenta os fatores mais significativos ao nível de confiança adotado, sobre a resposta largura da nuvem de dispersão atmosférica, indicando que as variáveis: (A) velocidade do vento, (E) Percentual de agente químico no tanque, (F) Diâmetro do orifício de vazamento e (G) Altura do orifício no tanque apresentam maior significância em relação às outras variáveis. Como o fator velocidade do vento se mostrou significativo apenas na dispersão no sentido transversal e também apresenta o menor valor de efeito frente aos outros fatores significativos, este não será considerado nas próximas etapas da análise do estudo realizado.

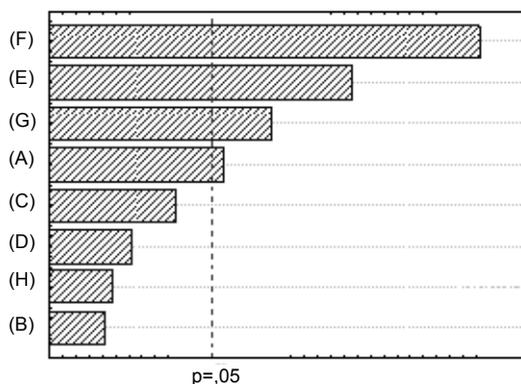


Figura 6. Gráfico de Pareto

A Figura 7 mostra as curvas de nível para os perfis de concentração do gás cloro para o nível máximo de exposição (AEGL 3), para as variáveis E e F indicando que o Percentual do agente químico (E) no tanque contribui para largura da nuvem tóxica quando o volume da substância ocupa entre 58 e 74% (níveis 0,4 a 1,2), da capacidade do tanque.

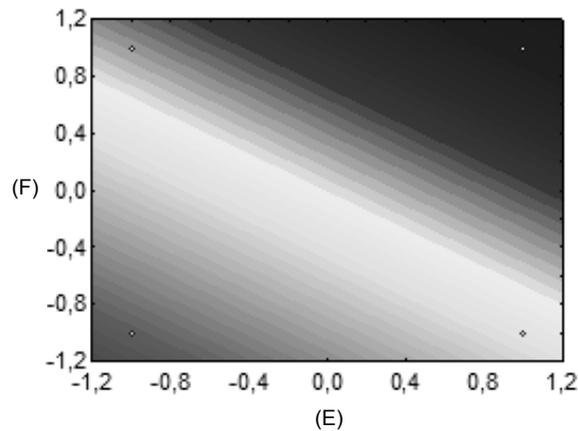


Figura 7. Curva de nível das variáveis F vs E

A Figura 8 apresenta as curvas de nível para o modelo considerando o nível máximo de exposição (AEGL 3), para as variáveis E e G, a qual indica que a Altura do vazamento (G) favorece a largura da nuvem quando está entre 0,4 a 0,8 m (-1,2 a -0,4).

A Figura 9 apresenta as curvas de níveis para as variáveis F e G, indicando que a região com Diâmetro do orifício de vazamento (F) entre 0,0038 a 0,0054 m (níveis 0,4 a 1,2), favorece o alcance máximo da largura da nuvem de dispersão atmosférica.

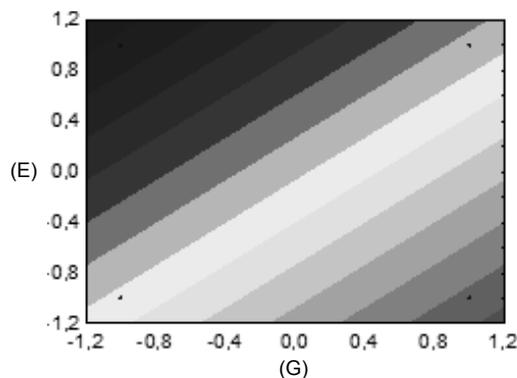


Figura 8. Curva de nível das variáveis E vs G

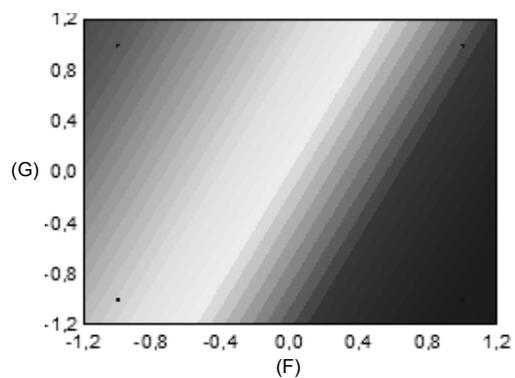


Figura 9. Curva de nível das variáveis G vs F

Através da análise realizada foi possível verificar que existem riscos significativos associados às instalações com recipientes de armazenamento de gás cloro nas indústrias que

fazem uso deste composto, pois são instalações que podem estar inseridas próximas a áreas vulneráveis. A partir dos resultados obtidos pelo ALOHA[®], verificou-se nos cenários que alguns fatores contribuem para o alcance das nuvens tóxicas. A análise estatística apontou que as variáveis (E) Percentual de agente químico no tanque, (F) Diâmetro do orifício de vazamento e (G) Altura do orifício no tanque apresentam maior significância em relação aos outros fatores, as quais contribuem para um aumento tanto no comprimento quanto na largura da nuvem de dispersão fornada durante o vazamento. Kramer e Montão [8] ao analisar cenários hipotéticos de vazamento de cloro também concluíram que quanto maior o volume de substância no tanque maior o alcance da nuvem de dispersão, circunstância que pode ser explicada pela pressão elevada no interior no recipiente. Além disso, a relação entre o diâmetro de vazamento e a dispersão de gás cloro pode ser justificada pela equação da Continuidade, a qual relaciona a vazão diretamente com a área de seção de escoamento, ou seja, quanto maior a área do furo no tanque maior a vazão de saída da substância e consequentemente maior o alcance da nuvem de dispersão.

4 Considerações finais

Ao analisar os riscos associados ao vazamento de gás cloro através do *software* ALOHA[®], com o auxílio do planejamento experimento, foi possível verificar que as variáveis (E) Percentual de agente químico no tanque, (F) Diâmetro do orifício de vazamento e (G) Altura do orifício no tanque estão diretamente relacionadas com maior concentração da substância na nuvem de dispersão atmosférica durante o vazamento. Portanto, a análise estatística para os cenários apresentados pelo *software* ALOHA[®] apresentaram resultados satisfatórios podendo ser considerada a possibilidade de uso dessa ferramenta como reforço na gestão da segurança já implantada numa indústria, contribuindo para a previsão e planejamento de ações emergenciais durante eventos acidentais envolvendo substâncias tóxicas estimando a magnitude das possíveis consequências.

5 Agradecimentos

Ao Programa Institucional de Desenvolvimento do Estudante - PDE/FURG e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq 2014, pelo auxílio financeiro através da bolsa EPEM e PIBITI.

Referências

- [1] FREITAS, C. M.; PORTE, M. F. S.; GOMEZ, C. M. Acidentes químicos ampliados: um desafio para a saúde pública. Centro de Estudo da Saúde do Trabalhador e Ecologia Humana. Escola Nacional de Saúde Pública (FIOCRUZ) - Rio de Janeiro, RJ - Brasil 1995.
- [2] GREENPEACE. BHOPAL: O desastre continua (1984-2002). Disponível em: <http://www.greenpeace.org.br>. Acesso em: mar/2016.
- [3] RODRIGUES, R. Vazamento em fábrica da Braskem intoxica moradores em Maceió. Brasil. Estadão. Disponível em: <http://brasil.estadao.com.br>. Acesso em nov/2014.

- [4] MASSA, C. B.; SCOTT, P.; ABRAMOVA, E.; GARDNER, C.; LASKIN, D.L.; GOWW, A. J.; Acute chlorine gas exposure produces transient inflammation and a progressive alteration in surfactant composition with accompanying mechanical dysfunction. *Toxicology and Applied Pharmacology*, vol. 278, p. 53-64, Jul. 2014.
- [5] BRASIL. Ministério do Trabalho. Limite de tolerância. Portaria 3214 de 08 de junho de 1978 – NR 15 – anexo 11.
- [6] WITHERS, R. M. J.; LEES, F. P.; The assessment of major hazards: The lethal toxicity of chlorine: Part 2, modelo f toxicity to man. *Journal of Hazardous Materials*, p. 283-302, Dez. 1985.
- [7] PANDYA, N.; GABAS, N.; MASRDEN, E. Sensitivity analysis of Phast's atmospheric dispersion model for three toxic materials (nitric oxide, ammonia, chlorine). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 25, p. 20-32, Jan. 2012.
- [8] KRAMER, C.R.; MONTAÑO, M.; Estudo de avaliação de riscos aplicados a estação de tratamento de esgotos de São José do Rio Preto. São Paulo-SP. 2010.
- [9] CARDOSO JUNIOR, M. M.; SCARPEL, R. A.; Estimativa do risco individual e social para o transporte de produtos perigosos pelo modal rodoviário utilizando um modelo simplificado. 2012.
- [10] SHAO, H., DUAN G. Risk quantitative calculation and ALOHA simulation on the leakage accident of natural gas power plant. International Symposium on Safety Science and Technology, vol. 45, p. 352-359, 2012.
- [11] TSENG, J. M., SU, T. S., KUO, C. Y. Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA. International Symposium on Safety Science and Technology, vol. 45, p. 384-389, 2012.
- [12] LOPES, T. J., BARROS, R., SANTOS, N.L., COSTELLI, M. C., SILVA, A., CANCELIER, A. Análise de risco aplicada a instalação industriais de refrigeração que utilizam amônia. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, vol. 19, p.160-166, 2015.
- [13] HANNA, S. R., GARY, A. B., RAYFORD. P. H., United States. Department of Energy Office of Energy Research, and United States. Department of Energy. Office of Health and Environmental Research. 1982. Handbook on atmospheric diffusion: prepared for the Office of Health and Environmental Research, Office of Energy Research, U.S. Department of Energy. [OakRidge, TN]: Technical Information Center, U.S. Dept. of Energy.
- [14] INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <http://www.inmet.org.br>. Acesso em: mar/2016.
- [15] BUTTON, S. T. Metodologia para Planejamento Experimental e Análise de Resultados. Programa de Pós Graduação (Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.
- [16] ZHAO, P., LIU, Z. Impacts of wind speed and leakage height on chlorine leakage diffusion. International Symposium on Safety Science and Technology, vol. 84, p. 672-681, 2014.