

**ESTUDO DA IGNIÇÃO HIPERGÓLICA DO PERÓXIDO DE
HIDROGÊNIO CONCENTRADO COM UM COMBUSTÍVEL
CATALITICAMENTE PROMOVIDO**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPQ/INPE)**

William Müller Meyer (EEL/USP, Bolsista PIBIQ/CNPq)

E-mail: wmmeyer4@gmail.com

Ricardo Vieira (CTE/LCP/INPE, Orientador)

E-mail: ricardo.vieira@lcp.inpe.br

Julho de 2016

**ESTUDO DA IGNIÇÃO HIPERGÓLICA DO PERÓXIDO DE
HIDROGÊNIO CONCENTRADO COM UM COMBUSTÍVEL
CATALITICAMENTE PROMOVIDO**

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPQ/INPE)

William Müller Meyer (EEL/USP, Bolsista PIBIQ/CNPq)

E-mail: wmmeyer4@gmail.com

Ricardo Vieira (CTE/LCP/INPE, Orientador)

E-mail: ricardo.vieira@lcp.inpe.br

Julho de 2016

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma base analítica e experimental de dados de um par hipergólico, com baixa toxicidade, baixo custo e aspectos favoráveis à propulsão, tais como: elevada densidade de empuxo e baixo atraso de ignição. Esse par é constituído, basicamente, de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) concentrado, como oxidante, e de uma mistura de etanol cataliticamente promovido, como combustível. Primeiramente, foi realizada a concentração do H_2O_2 comercial, elevando sua concentração de 70% para 90%. Em seguida, foram preparadas diferentes soluções de etanolamina catalisadas com diferentes sais de metais de transição para estudar a eficiência destes na decomposição do H_2O_2 . O nitrato de cobre foi o material que apresentou a maior eficiência nesta reação, complexando com a etanolamina e gerando um combustível hipergólico com o H_2O_2 . Na sequência, estudou-se a incorporação do etanol ao combustível. Para definir uma proporção adequada entre etanol, etanolamina e catalisador foi empregado um planejamento de experimentos do tipo estrela no qual o atraso de ignição foi a resposta de interesse.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1.1 - Unidade concentradora de H ₂ O ₂	8
Figura 2.4.1 - Projeto do tipo estrela utilizado no planejamento dos experimentos.....	11
Figura 3.1 - Imagens sequenciadas do teste da gota empregando nitrato de cobre como catalisador.....	14
Figura 3.2 - Curva de superfície de resposta, mostrando o atraso de ignição em função da percentagem de Cu ²⁺ e etanol.....	16
Figura 3.3 - Curvas de nível, mostrando o atraso de ignição em função da percentagem de Cu ²⁺ e etanol.....	17

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.2.1- Misturas hipergólicas a base de peróxido de hidrogênio.....	09
Tabela 2.4.1 - Tabela de planejamento de experimentos para a otimização do combustível.....	11
Tabela 3.1 - Resultados do teste da gota empregando o par hipergólico H ₂ O ₂ e etanolamina promovida com diferentes catalisadores	13
Tabela 3.2 - Resultados obtidos a partir do planejamento estrela realizado buscando a otimização do combustível cataliticamente promovido.....	15
Tabela 3.3 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento estrela.....	17

SUMÁRIO

	Pág.
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	06
2. METODOLOGIA	08
2.1 Concentração do H ₂ O ₂	08
2.2 Preparo do combustível cataliticamente promovido.....	09
2.3 Teste da gota.....	10
2.4 Otimização do combustível.....	10
3. RESULTADOS	12
4. CONCLUSÃO	18
5. REFERÊNCIAS	19

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Sistemas de propulsão química de motores de foguetes utilizam reações de combustão de propelentes líquidos ou sólidos para produzir o empuxo (Sutton e Biblarz, 2001). Os propelentes líquidos mais empregados atualmente são a hidrazina e seus derivados, como combustível, e o tetróxido de nitrogênio como oxidante. No entanto, todos estes propelentes são importados, extremamente caros e altamente tóxicos (Sutton e Biblarz, 2001; Keese *et al.*, 2004; Shamshina *et al.*, 2010; Ak *et al.*, 2011).

Na última década, em função da crescente preocupação quanto à segurança ambiental, tem sido despertado um grande interesse por propelentes líquidos estocáveis e não tóxicos. O peróxido de hidrogênio (H_2O_2) é um dos mais importantes candidatos para aplicação como oxidante em sistemas propulsivos limpos (não tóxicos) e de baixo custo (Batonneau *et al.*, 2014). Diante destas vantagens, surge a necessidade de desenvolvimento de um combustível adequado para formação de um par com o H_2O_2 . Porém, alguns fatores devem ser levados em consideração na escolha do material combustível, tais como: hipergolicidade, tempo de indução, toxicidade e custo.

Hipergolicidade é o resultado da combustão espontânea de uma mistura de propelentes (combustível e oxidante), a temperatura ambiente, na ausência de qualquer fonte de ignição (Maag e Klingenberg, 1996; Batonneau *et al.*, 2014). Propulsores hipergólicos possibilitam múltiplas partidas do motor-foguete sem a necessidade de complexos mecanismos de ignição.

Esta é uma característica importante para algumas aplicações aeroespaciais, tais como: propulsores de controle de atitude de satélites, motores de rolamento de foguetes e sistemas de aproximação. O tempo de indução da reação espontânea é outro fator muito importante na escolha dos propelentes, pois o atraso da ignição pode gerar picos de pressão indesejáveis e até causar explosões e consequentes danos ao propulsor (Davis e Yilmaz, 2014).

O Centro Naval de Armas de Guerra Aérea dos EUA (*US Naval Air Warfare Center*) desenvolveu um combustível não tóxico chamado *Block 0*, composto de uma suspensão coloidal de óxido de manganês em metanol. O combustível é totalmente

miscível e hipergólico com o H_2O_2 concentrado (Purcell *et al.*, 2002). Mais tarde, um grupo de pesquisa da Universidade de Purdue (Pourpoint e Anderson, 2007) estudou o efeito da pressão e da concentração do H_2O_2 no tempo de indução da reação com o *Block 0*. Os autores observaram que a redução da pressão atmosférica e da concentração do H_2O_2 eleva, significativamente, o tempo de indução desta reação. Também foi observado que o aumento da concentração do catalisador no combustível reduz o tempo de indução. Contudo a quantidade de catalisador empregada no *Block 0* é muito elevada (10 a 30% em peso), inviabilizando seu emprego em certas aplicações, seja pelo custo, pela possível sedimentação do catalisador no reservatório em função do tempo, ou por eventuais incrustações na garganta da tubeira do motor-foguete, resultante da combustão do propelente carregado em sais.

Melof e Grubelich (2001) testaram uma variedade de combustíveis como pares hipergólicos do H_2O_2 90%, sendo o melhor resultado obtido com o emprego da etanolamina promovida com cloreto de cobre (CuCl_2). Recentemente Ak *et al.* (2011) estudaram o efeito da concentração do catalisador na etanolamina no tempo de ignição, empregando H_2O_2 concentrado como oxidante.

Diante desse contexto, o desenvolvimento de um novo combustível a partir da mistura do etanol e da etanolamina, cataliticamente promovida com sais de metais de transição, se mostra bastante atrativo economicamente, uma vez que o Brasil é o país mais avançado, do ponto de vista tecnológico, na produção e no uso do etanol como combustível. Do ponto de vista estratégico, isto poderia ainda ser incrementado com a aplicação do etanol como combustível de foguete. Vale ainda destacar que o etanol apresenta um elevado calor de combustão, gerando uma densidade de energia de aproximadamente 24 MJ/L a partir de sua combustão completa. O H_2O_2 também é abundante no mercado nacional e com preços muito interessantes. Sendo assim, por se tratar de tecnologias estratégicas referentes à Propulsão Espacial, acredita-se que a união inédita do H_2O_2 concentrado e do etanol cataliticamente promovido venha apresentar resultados interessantes para o desenvolvimento de propulsores a bipropelentes líquidos, hipergólicos, de baixo custo e não agressivos ao meio ambiente.

2. METODOLOGIA

Todos os experimentos realizados neste trabalho foram realizados no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LCP), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em Cachoeira Paulista, SP.

2.1 Concentração do H₂O₂

Esta etapa consistiu em elevar a concentração do H₂O₂ 70% para algo em torno de 90%, através da secagem do produto por um fluxo em contra corrente de ar seco. Todo o H₂O₂ 70% utilizado neste trabalho tem sido gentilmente doado pela empresa Peróxidos do Brasil Ltda. Cumpre destacar que o aluno participou ativamente em todas as etapas de montagem da unidade concentradora de peróxido (Figura 2.1.1), que atualmente, atende toda a demanda de peróxido concentrado do LCP.

Figura 2.1.1 - Unidade concentradora de H₂O₂



2.2 Preparo do combustível cataliticamente promovido

O H_2O_2 não forma par hipergólico com a maioria dos combustíveis, sendo necessário o uso de aditivos ao combustível, tais como: catalisadores, promotores e soluções tampão, de modo que a reação de combustão espontânea seja possível em temperatura e pressão ambiente, e apresente baixo atraso de ignição. Atualmente, na literatura se destacam dois tipos de misturas hipergólicas envolvendo o H_2O_2 :

Tabela 2.2.1- Misturas hipergólicas a base de peróxido de hidrogênio

	Par hipergólico 1	Par hipergólico 2
Oxidante	H_2O_2	H_2O_2
Combustível	Metanol	Metanol
Promotor	Acetamida	Etanolamina
Catalisador	$KMnO_4 + Mn(CH_3COO)_2$ Ácido acético	sal
Tampão pH	+	-
	acetato de potássio	

O primeiro par hipergólico apresentado na Tabela 2.1.1 corresponde a uma solução coloidal contendo íons manganês. Todavia esta combinação se mostrou inadequada para uso em escala comercial, devido à necessidade de constante ajuste do pH e a alta pureza dos componentes envolvidos, para evitar sedimentação das partículas e promover a hipergolicidade. Já o segundo par mostra-se mais estável e corresponde a um combustível mais simples, uma vez que só possui um álcool, etanolamina e pequena quantidade de um sal.

De acordo com Schumb *et al.*, uma grande quantidade de compostos inorgânicos permite a decomposição do H_2O_2 . Nestes compostos, o cátion, geralmente um metal de transição, é o principal agente catalisador da reação de decomposição, sendo que os ânions, em regra, são inibidores da mesma. Sendo assim, foram realizados testes preliminares de um par hipergólico constituído basicamente de peróxido de

hidrogênio, etanolamina e diferentes sais como catalisador. O catalisador foi adicionado a etanolamina de modo a atingir uma concentração do cátion equivalente a 2% em massa.

Os sais utilizados neste trabalho foram: cloreto de cobre, nitrato de cobre, nitrato de manganês, acetato de manganês, nitrato de chumbo, sulfato de manganês, acetato de cobalto, nitrato de ferro, permanganato de potássio, nitrato de cobalto, acetilcetonato de níquel. O processo de dissolução dos sais foi realizado com auxílio de um agitador mecânico.

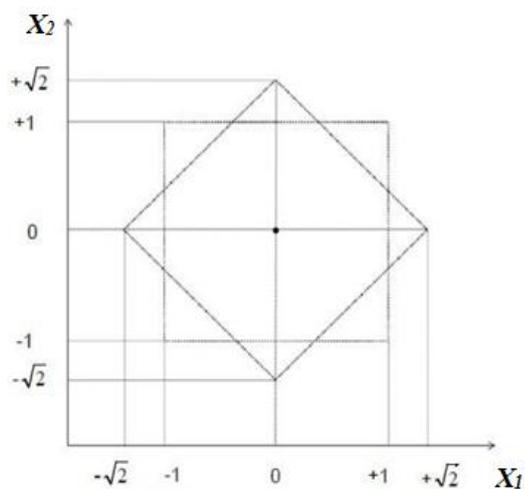
2.3 Teste da gota

A hipergolicidade dos pares testados foi avaliada através do teste da gota (*drop test*). Este teste consistiu em gotejar uma única gota de H₂O₂ 90% sobre uma pequena quantidade de cada um dos combustíveis testados. O teste foi monitorado com o auxílio de uma câmera de alta velocidade da marca FASTEC, modelo S3, com velocidade de 3000 quadros por segundo. Este procedimento permitiu uma avaliação da hipergolicidade de cada par testado. Os experimentos foram realizados com intuito de definir o catalisador que apresentou maior eficiência na reação, o qual foi selecionado para o desenvolvimento das subseqüentes etapas do trabalho.

2.4 Otimização do combustível

Tendo em vista a grande cadeia produtiva nacional e o elevado poder energético do etanol, foi proposto uma análise de sua adição ao combustível estudado. Para isso fez-se necessária a elaboração de um planejamento de experimento para a determinação da influência do teor de etanol no combustível. Ao mesmo passo em que eram avaliadas as influências das concentrações de etanolamina e de sais de cobre no sistema. Para tanto, os fatores de interesse estudados foram a percentagem (v/v) de etanol e o percentual (m/v) do cátion metálico no combustível, sendo o tempo de ignição a resposta de interesse para o sistema. A Figura 2.4.1 apresenta o projeto utilizado no planejamento dos experimentos.

Figura 2.4.1 - Projeto do tipo estrela utilizado no planejamento dos experimentos.



A Tabela 2.4.1 apresenta as condições utilizadas em cada experimento bem como seus respectivos níveis (X_1 e X_2).

Tabela 2.4.1 - Tabela de planejamento de experimentos para a otimização do combustível.

Exp	X_1	X_2	ϵ_1 (% de etanol)	ϵ_2(% de Cu^{2+})
1	-1	-1	25	1
2	-1	1	25	3
3	1	1	75	3
4	1	-1	75	1
5	0	0	50	2
6	0	0	50	2
7	0	0	50	2
8	-1,41	0	14,6	2
9	0	1,41	50	3,4142
10	1,41	0	85,35	2
11	0	-1,41	50	0,5858

No tipo de planejamento adotado as variáveis codificadas (X) estão relacionadas com as variáveis naturais (ϵ) de acordo com a Equação 2.4.1:

$$X = \frac{\epsilon - C}{\frac{\Delta}{2}} \quad (2.4.1)$$

Na qual C é valor da variável natural no nível central e Δ é a diferença entre variável natural nos níveis +1 e -1.

Os valores da variável tempo de resposta foram obtidos com o uso de uma câmera de alta velocidade da marca FASTEC, modelo S3, com velocidade de 3000 quadros por segundo.

3. RESULTADOS

A velocidade de ignição está relacionada ao caráter altamente reativo e ao grau de miscibilidade entre H_2O_2 e do combustível utilizado. A decomposição energética do H_2O_2 concentrado incrementa a atomização e a vaporização do combustível, levando à autoignição do sistema, uma vez que o calor liberado possibilita o alcance da temperatura de ignição.

Os resultados obtidos utilizando a etanolamina catalisada com diferentes sais são apresentados na Tabela 3.1. Através destes dados pode-se observar que apenas o cloreto e o nitrato de cobre foram eficientes na decomposição do H_2O_2 , tornando o combustível hipergólico com o H_2O_2 . Portanto, os sais de cobre foram os únicos a promoverem a decomposição do peróxido com nível de liberação de energia suficiente para a ignição do sistema, permitindo assim a obtenção de um par hipergólico. Porém, o sal com melhor desempenho poderá ser determinado através do atraso de ignição, uma das grandezas mais importantes para um sistema propulsivo, que representa o tempo entre o contato do oxidante com o combustível e a ignição (Davis e Yilmaz, 2014).

Tabela 3.1 - Resultados do teste da gota empregando o par hipergólico H_2O_2 e etanolamina promovida com diferentes catalisadores.

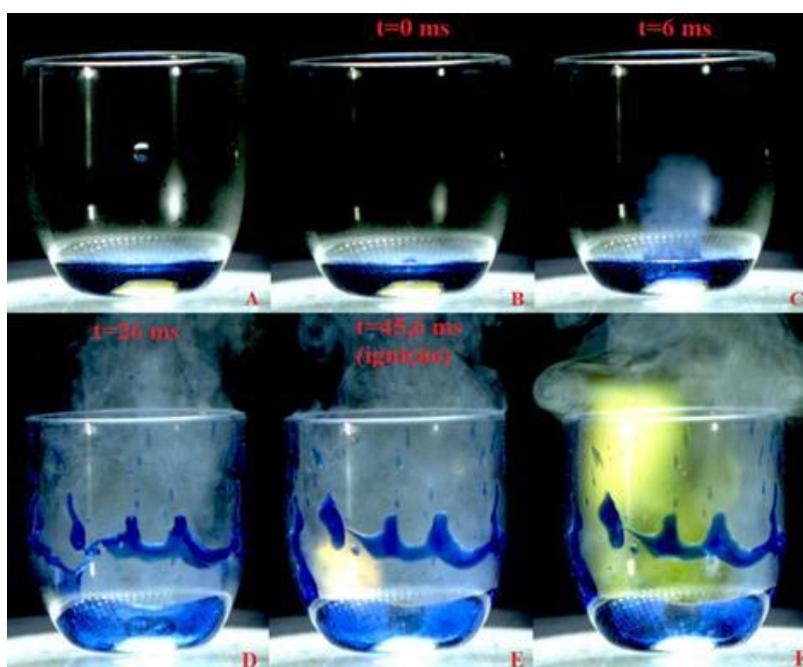
Exp	Composto	Etanolamina + 2% de cátion + 1 gota de H_2O_2 90%
1	Cloreto de cobre	
2	Nitrato de cobre	Hipergólico
3	Nitrato de manganês	
4	Acetato de manganês	Decomposição Vigorosa
5	Nitrato de chumbo	
6	Sulfato de manganês	
7	Acetato de cobalto	
8	Nitrato de ferro	Decomposição Rápida
9	Permanganato de potássio	
10	Nitrato de cobalto	Decomposição média
11	Acetilacetato de níquel	

A Figura 3.1 mostra as imagens de um teste da gota, empregando a câmera de alta velocidade. Através das imagens foi possível mensurar o atraso de ignição do par hipergólico utilizado. O valor do atraso de ignição obtido empregando o nitrato de cobre como catalisador foi de aproximadamente 46 ms. Valor este bem inferior aquele obtido no teste com o combustível contendo cloreto de cobre, o qual foi em torno de 55 ms.

A Figura 3.1B mostra o momento em que ocorre o contato entre o oxidante e o combustível, este instante é adotado como o tempo inicial para a medida do atraso de ignição. A Figura 3.1C apresenta o início da reação de decomposição do H_2O_2 , nessa imagem é possível observar os gases resultantes da decomposição do peróxido, juntamente com uma parcela de combustível volatilizado. Já a Figura 3.1D evidencia o energético processo de decomposição do H_2O_2 , liberando uma grande quantidade de calor devido a elevada exotermicidade da reação. Finalmente, a Figura 3.1E identifica o momento exato do início da autoignição dos propelentes na fase gasosa. Deste modo, o

atraso de ignição envolve um período de decomposição do oxidante e de volatilização do combustível, bem como um determinado atraso relacionado com o mecanismo de ignição na fase gasosa. O processo de decomposição do H_2O_2 promove a volatilização do combustível e a geração de O_2 a alta temperatura, o que ocasiona a autoignição do sistema.

Figura 3.1 - Imagens sequenciadas do teste da gota empregando nitrato de cobre como catalisador.



De acordo com a literatura, a autoignição pode ocorrer conforme o mecanismo de ramificação de cadeia ou mecanismo térmico ou uma combinação dos dois. A ignição por ramificação de cadeia se baseia em reações de iniciação, ramificação, propagação e terminação de cadeia, em que a taxa de reação aumenta devido às etapas de ramificação, as quais provocam o crescimento exponencial dos centros de propagação da cadeia. Já o mecanismo térmico é baseado em um conceito mais simples, ou seja, quando a taxa de liberação de energia térmica pela reação for maior do que a taxa de dissipação de energia térmica (perda), tem-se uma condição explosiva ou de ignição. Quando ocorre o contrário, a explosão térmica é impossível. Já quando as duas

taxas são iguais, tem-se a condição crítica de ignição (Semenov, 1935; Hinshelwood, 1940; Glassman e Yetter, 2008).

Sendo assim, o combustível contendo nitrato de cobre foi o escolhido para a continuação do trabalho, pois através da decomposição do H_2O_2 concentrado para aquecer, vaporizar e inflamar o combustível, promoveu a ignição do sistema em um menor intervalo de tempo.

Após a definição do catalisador utilizado no combustível a ser estudado, processou-se o estudo da influência do teor de cobre no combustível cataliticamente promovido, assim como as influências das concentrações de etanol e etanolamina. Os resultados foram encontrados em função do tempo de atraso de ignição da mistura e estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Resultados obtidos a partir do planejamento estrela realizado buscando a otimização do combustível cataliticamente promovido

Exp	X₁	X₂	ε₁ (% de etanol)	ε₂(% de Cu²⁺)	τ (ms)
1	-1	-1	25	1	70,0
2	-1	1	25	3	30,3
3	1	1	75	3	38,0
4	1	-1	75	1	63,0
5	0	0	50	2	29,8
6	0	0	50	2	30,5
7	0	0	50	2	29,5
8	-1,41	0	14,6	2	38,0
9	0	1,41	50	3,4142	33,0
10	1,41	0	85,35	2	40,0
11	0	-1,41	50	0,5858	75,0

Os gráficos de superfície de resposta e de curvas de nível obtidos através dos experimentos são apresentados pelas figuras 3.2 e 3.3, respectivamente.

Figura 3.2 - Curva de superfície de resposta, mostrando o atraso de ignição em função da percentagem de Cu^{2+} e etanol.

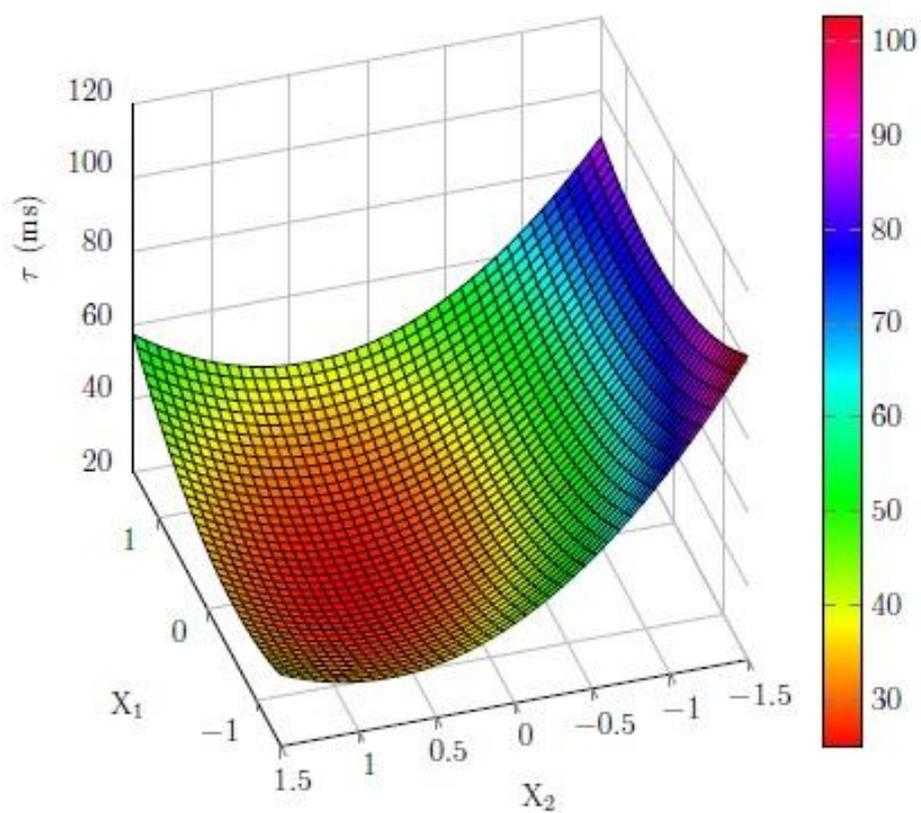
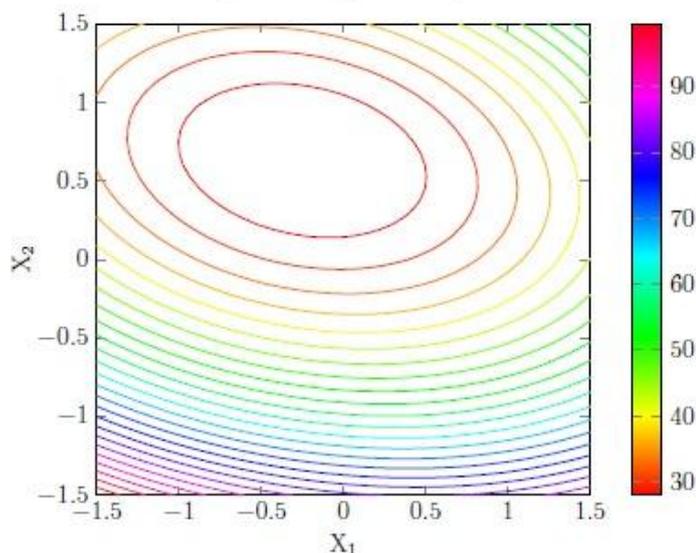


Figura 3.3 - Curvas de nível, mostrando o atraso de ignição em função da percentagem de Cu^{2+} e etanol.



Os dados obtidos foram ajustados a um modelo quadrático conforme mostra a equação a seguir:

$$\tau = 29,918 + 0,436X_1 - 15,5342X_2 + 5,506X_1^2 + 13,051X_2^2 + 3,668X_1X_2 \quad (4.30)$$

A Tabela 3.3 apresenta a análise de variância (ANOVA) para o planejamento estrela proposto. Através do teste F, com grau de confiança de 95%, é possível determinar que o modelo é significativo, uma vez que para esse nível de confiança $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$.

Tabela 3.3 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento estrela.

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	F_{calc}	F_{tab}	$\bar{\tau}$	DP	R^2
Regressão	2951,88	5	590,38	91,96	5,05	43,37	6,42	0,989
Resíduo	32,10	5	6,42					
Total	2983,98	10						

Uma vez determinado que o modelo é significativo, determinou-se a condição que proporciona o menor atraso de ignição através da derivação parcial da equação obtida, conforme mostram a Equação :

$$\frac{\partial X_1}{\partial \tau} = \frac{\partial X_2}{\partial \tau} = 0 \quad (3.1)$$

Os valores encontrados para as variáveis codificadas, X_1 e X_2 , são -0,227 e 0,563, respectivamente. Sendo assim, tem-se que os valores das variáveis naturais, ε_1 e ε_2 , são iguais a 44,33% e 2,56%, respectivamente. Substituindo os valores ótimos codificados de X_1 e X_2 na equação obtida, é esperado um atraso mínimo de ignição de 25,02 ms. Para a comprovação do modelo encontrado, foram realizados cinco testes utilizando a condição ideal obtida através do planejamento de experimento. O resultado obtido foi um atraso de ignição médio de $22,398 \pm 2,947$ ms. Vale salientar, que também foram realizados testes utilizando como combustível a etanolamina pura promovida com a mesma concentração de catalisador utilizada na mistura ótima de etanol e etanolamina. Para esses testes foi encontrado um atraso de ignição médio de 36,11 ms. Sendo assim, a adição de etanol ao combustível reduz o atraso de ignição.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram que o uso do H_2O_2 é muito promissor pelo fato deste ser hipergólico com a etanolamina quando empregado um catalisador adequado. É importante também destacar que o H_2O_2 é bastante atrativo economicamente e não é tóxico.

A etanolamina se mostrou um bom par para o peróxido, devido a sua facilidade na formação de um complexo à base de cobre, bastante ativo nesta reação.

Dentre os catalisadores investigados, apenas o cloreto e o nitrato de cobre foram eficientes na decomposição do H_2O_2 , sendo que o combustível contendo o nitrato de cobre foi o escolhido para a continuação do trabalho.

O estudo da incorporação de etanol à etanolamina catalisada, empregando um planejamento de experimentos, permitiu a obtenção de um combustível hipergólico com o H_2O_2 , de baixo custo e não agressivo ao meio ambiente. Além disso, pode-se concluir que além da adição ser interessante do ponto de vista ambiental e econômico, também é favorável do ponto de vista propulsivo.

5. REFERÊNCIAS

AK, M. A.; ULAS, A.; SÜMER, B.; YAZICI, B.; YILDIRIM, C.; GÖNC, L. O.; ORHAN, F. E. An experimental study on the hypergolic ignition of hydrogen peroxide and ethanolamine. **Fuel**, v. 90, n. 1, p. 395-398 2011.

BATONNEAU, Y.; BRAHMI, R.; CARTOIXA, B.; FARHAT, K.; KAPPENSTEIN, C.; KEAV, S.; KHARCHAFI-FARHAT, G.; PIRAULT-ROY, L.; SAOUABÉ, M.; SCHARLEMANN, C. Green Propulsion: Catalysts for the European FP7 Project GRASP. **Topics in Catalysis**, v. 57, n. 6-9, p. 656-667 2014.

DAVIS, S. M.; YILMAZ, N. Advances in Hypergolic Propellants: Ignition, Hydrazine, and Hydrogen Peroxide Research. **Advances in Aerospace Engineering**, v. 2014, p. 1-9 2014.

GLASSMAN, I.; YETTER, R. A. **Combustion**. Elsevier Science, 2008. ISBN 9780080568812.

HINSHELWOOD, C. N. **The Kinetics of Chemical Change**. London: Oxford University Press, 1940.

KEESE, D. L.; MELOF, B. M.; INGRAM, B. V. **Hydrogen Peroxide-Based Propulsion and Power Systems** Sandia National Laboratories, 2004.

MAAG, H. J.; KLINGENBERG, G. Gun Propulsion Concepts. Part II: Solid and Liquid Propellants. **Propellants, Explosives, Pyrotechnics**, v. 21, n. 1, p. 1-7 1996.

MELOF, B.; GRUBELICH, M. Investigation of hypergolic fuels with hydrogen peroxide. In: (Ed.). **37th Joint Propulsion Conference and Exhibit**: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001. (Joint Propulsion Conferences).

POURPOINT, T. L.; ANDERSON, W. E. Hypergolic reaction mechanisms of catalytically promoted fuels with rocket grade hydrogen peroxide. **Combustion Science and Technology**, v. 179, n. 10, p. 2107-2133 2007.

PURCELL, N.; DIEDE, A.; MINTHORN, M. **Test results of new reduced-toxicity hypergols for use with hydrogen peroxide oxidizer**. 5th International Hydrogen Peroxide Propulsion Conference. USA 2002.

SEMENOV, N. N. **Chemical kinetics and chain reactions**. Oxford: Clarendon Press, 1935.

SHAMSHINA, J. L.; SMIGLAK, M.; DRAB, D. M.; PARKER, T. G.; DYKES, J. H. W. H.; DI SALVO, R.; REICH, A. J.; ROGERS, R. D. Catalytic ignition of ionic liquids for propellant applications. **Chemical Communications**, v. 46, n. 47, p. 8965-8967 2010.

SUTTON, G. P.; BIBLARZ, O. **Rocket Propulsion Elements**. Wiley, 2001. ISBN 9780471326427.

Bolsista: William Müller Meyer

Orientador: Dr. Ricardo Vieira