



OS MÍSSEIS "PATRIOT" NA Iª GUERRA DO GOLFO

UMA FALHA
CATASTRÓFICA QUE
PODERIA TER SIDO
EVITADA

OS MÍSSEIS “PATRIOT” NA Iª GUERRA DO GOLFO

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO
2. OS MÍSSEIS BALÍSTICOS TÁTICOS “SCUD”
3. O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991
4. CONCLUSÕES
5. BIBLIOGRAFIA

INTRODUÇÃO

- A I Guerra do Golfo (2 de agosto de 1990 a 28 de fevereiro de 1991) foi resultado da invasão do Kuwait pelo Iraque, sob a liderança de Saddam Hussein, baseado numa disputa territorial entre os dois países quanto aos direitos de exploração do petróleo.
- Quatro dias após a invasão, a Arábia Saudita solicitou que países de nações amigas (principalmente EUA, GB e países árabes e muçulmanos) a ajudasse a repelir uma eventual invasão iraquiana - com o desdobramento de tropas estrangeiras em seu território.
- Uma semana após a invasão do Kuwait, o CS da ONU aprovou a Resolução nº 662, declarando ilegal a anexação daquele país pelo Iraque.

INTRODUÇÃO

- Dentre os países árabes e muçulmanos que fizeram parte da Coalizão formada para repelir um ataque à Arábia Saudita e, posteriormente, expulsar o Iraque do Kuwait, estavam países como Abu Dhabi, Bahrein, Egito, Marrocos, Paquistão, Qatar, Síria, Turquia e Emirados Árabes Unidos.
- Esses países tinham muito em comum com o Iraque e a manutenção deles na Coalizão foi um exercício de diplomacia e convencimento por parte de todos os países envolvidos.
- Era fundamental que Israel não entrasse no conflito!

INTRODUÇÃO

- Israel foi persuadido a não se envolver no conflito por meios diplomáticos (particularmente por parte dos EUA), mas a ameaça de ataque iraquiano – empregando **armamento bacteriológico** ou **químico** – persistia, através de dois meios:
 - Bombardeiros **Sukhoi Su-24 Fencer**;
 - Mísseis balísticos táticos (TBM) **SS-1C “Scud-B”** e suas variantes desenvolvidas pelos iraquianos, **“al-Hussain”** e **“al-Abbas”**.
- Uma dúvida era se os mísseis balísticos de médio alcance (IRBM) **Badr 2000**, baseado no míssil **Condor-2** – desenvolvido conjuntamente pelo Egito, Iraque e Argentina – estariam operacionais (suspeita-se até hoje que Israel sabotou o centro de pesquisas iraquianas em al-Iskandariyah, envolvido no seu desenvolvimento).

INTRODUÇÃO

- Em antecipação a um eventual ataque iraquiano, Israel recebeu dos EUA uma enorme quantidade de máscaras de gás para a sua população, bem como duas baterias de mísseis antimísseis "**Patriot**".
- O risco de uma retaliação israelense em caso de ataque era real: afora a sua Força Aérea, Israel dispunha de IRBMs **Jericó 2** com alcance de 1.450 km e capaz de transportar uma ogiva nuclear.
- Para prevenir uma resposta israelense, os EUA não compartilharam informações a respeito da posição dos lançadores de mísseis "Scud".

OS MÍSSEIS “PATRIOT” NA Iª GUERRA DO GOLFO

SUMÁRIO

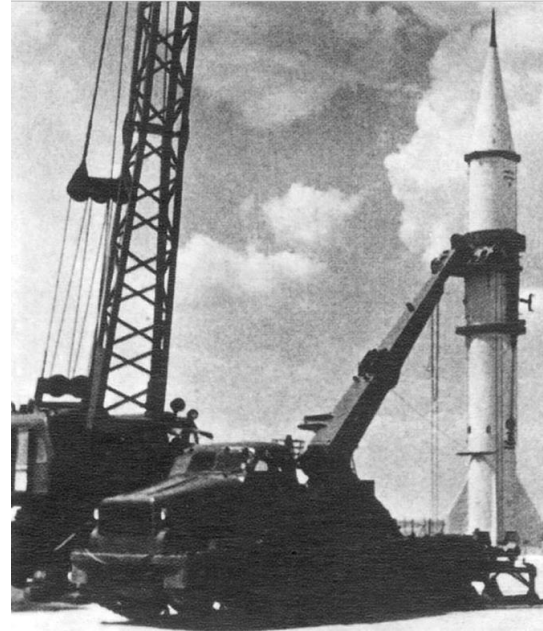
1. INTRODUÇÃO
2. **OS MÍSSEIS BALÍSTICOS TÁTICOS “SCUD”**
3. O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991
4. CONCLUSÕES

OS MÍSSEIS BALÍSTICOS TÁTICOS “SCUD”



OS MÍSSEIS BALÍSTICOS TÁTICOS “SCUD”

- Desenvolvidos na URSS, os mísseis **R-11 Zemlya** (“Terra”, em russo), designados pela OTAN como **SS-1B “Scud-A”**, eram baseados nos mísseis **A-4** (conhecidos popularmente como **V-2**) desenvolvidos pela Alemanha Nazista, tendo entrado em serviço em 1957.



Uma V-2 sendo preparada para lançamento em Cuxhaven, Alemanha, em 1945 (esq.)

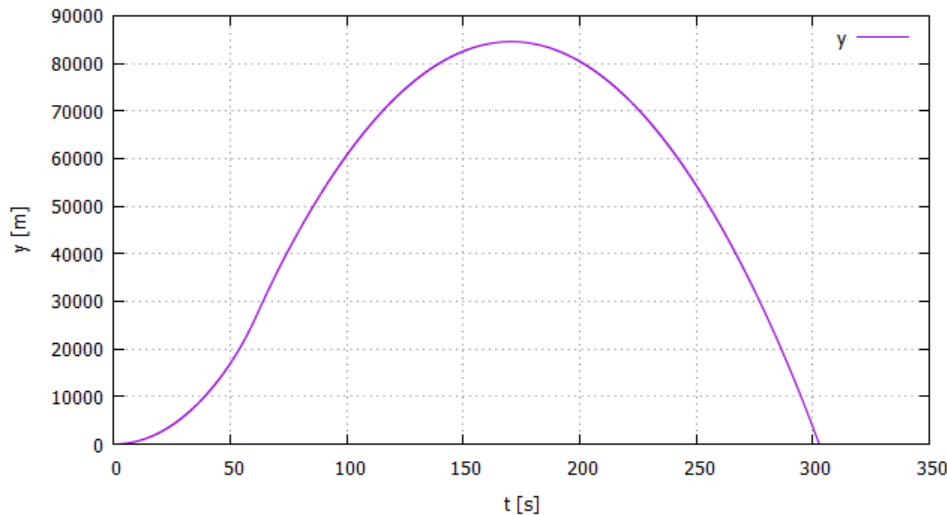
Um míssil R-11M sendo erigido para lançamento na URSS, em 1958 (dir.)

OS MÍSSEIS BALÍSTICOS TÁTICOS “SCUD”

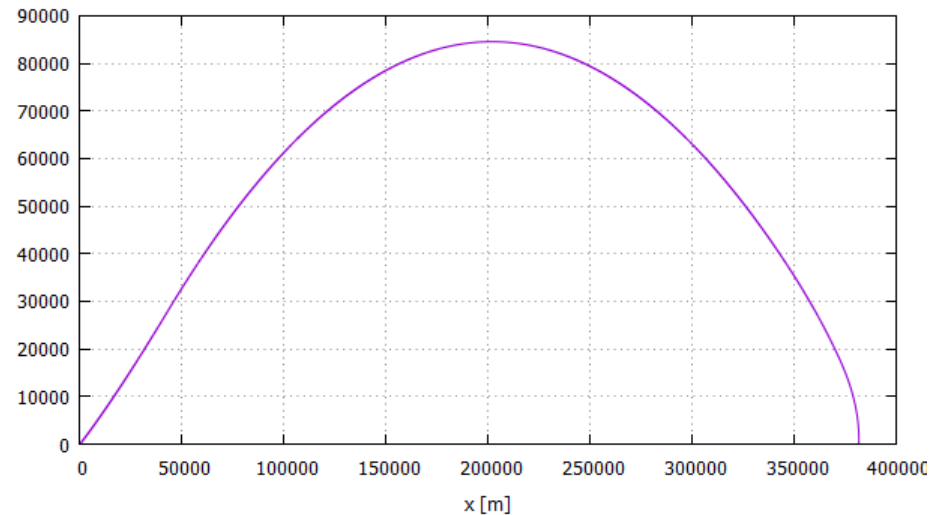
- Em 1961, a URSS colocou em serviço o **R-17 Elbrus** (OTAN: **SS-1C “Scud-B”**):
 - Características: 1 estágio, de combustível líquido.
 - Dimensões: 11,16 m (comprimento); 0,77 m (diâmetro)
 - Alcance: 300 km.
 - CEP: 450 m.
 - Navegação: inercial.
 - Carga útil: 990 kg.
 - Cabeça de guerra: **explosivo convencional, química** (gás nervoso VX), **termobárico** e **termonuclear** (5 a 80 KT);
 - Velocidade terminal: aproximadamente 1600 m/s=**4,70 Mach**.

OS MÍSSEIS BALÍSTICOS TÁTICOS “SCUD”

Scud-B - Altitude



Scud-B - Deslocamento vs Altitude



Resultados numéricos de simulação usando como dados [FETTER, 1998]:

$$m_0 = 5865 \text{ kg}, m_F = 2269 \text{ kg},$$

$$A = 0,60 \text{ m}^2$$

$$I_{sp} = 240 \text{ s}$$

$$t_{bo} = 62 \text{ s}$$

$$\text{Altitude no "burn-out": } y_{bo} = 27,80 \text{ km}$$

$$\text{Altitude máxima: } y_{\max} = 84,54 \text{ km}$$

$$\text{Velocidade terminal: } v = 1323,69 \text{ m/s} = 3,89 \text{ M}$$

$$\text{Impacto com o solo: } t_{h=0} = 302,815 \text{ s}$$

$$\text{Alcance máximo: } x_{\max} = 381,70 \text{ km}$$

OS MÍSSEIS BALÍSTICOS TÁTICOS “SCUD”

- Estima-se que a URSS vendeu entre **650** a **819** mísseis “Scud-B” ao Iraque, bem como 36 veículos articulados **MAZ-543**, de 8 rodas, com mecanismo de ereção e lançamento do míssil (TEL), com velocidade máxima de 45 km/h (estradas pavimentadas) e 15 km/h (terreno sem pavimentação).
- O Iraque desenvolveu também duas versões:
 - O “**al-Hussain**” com alcance de 600 km e carga útil de 500 kg ;
 - O “**al-Abbas**” com alcance de 850 km e carga útil de 250 kg.
 - * ambas com capacidade de emprego NBQ.
- Há relatos de que o Iraque possuía **400** mísseis **al-Hussain** em 1990.

OS MÍSSEIS BALÍSTICOS TÁTICOS “SCUD”

- O “**Scud**” é o míssil mais usado até hoje (com exceção das **V-2**):
 - Guerra do Yom Kippur, 1973 (lançados pelo Egito contra Israel);
 - Lançado pela Líbia contra Lampedusa em 1986;
 - Mais de **1.700** “Scud-B” lançados pela URSS e Afeganistão contra os mujahedin durante a guerra no Afeganistão (1988-1992);
 - Usado no Lêmen e Chechênia;
 - Durante a guerra Irã-Iraque, foram lançados pelo Iraque **520** mísseis “Scud-B” (incluindo **189** da variante “al-Hussain”); o Irã lançou uma quantidade equivalente de variantes do “Scud” fabricados pela Coreia do Norte.

OS MÍSSEIS BALÍSTICOS TÁTICOS “SCUD”

- **Como é lançado um “Scud”?**
 - Através de **lançadores móveis**:
 - Além dos TEL **MAZ-543**, o Iraque desenvolveu também outros dois TELs, convertendo caminhões de carga pesada, denominados de “**al-Waleed**” e “**al-Nidal**”;
 - Eram apoiados por caminhões tanque e de transporte de mísseis de reposição;
 - Os iraquianos haviam aperfeiçoado a técnica de lançamento, reduzindo o tempo necessário para 30 minutos a partir de locais previamente preparados (na URSS era de 90 minutos).

OS MÍSSEIS BALÍSTICOS TÁTICOS “SCUD”

- **Como é lançado um “Scud”?**
 - Através de **lançadores fixos**:
 - Havia mais de 30 sítios de lançamento de mísseis espalhados pelo Iraque, principalmente em torno das estações de bombeamento de petróleo H2 e H3 ao longo do principal oleoduto que cruza o Iraque, mas também próximos a Bagdá, Taji e Daura;
 - Esses sítios haviam sido preparados durante a guerra Irã-Iraque, na qual ambos países fizeram uso de mísseis do tipo “Scud” (o Irã usou versões produzidas pelos norte-coreanos, “**Hwasong-5**”).

OS MÍSSEIS “PATRIOT” NA Iª GUERRA DO GOLFO

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO
2. OS MÍSSEIS BALÍSTICOS TÁTICOS “SCUD”
3. **O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991**
4. CONCLUSÕES

O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991

- O principal meio de defesa disponível no conflito contra um míssil “Scud”, após ele ter sido lançado, eram os mísseis antimísseis de fabricação norte-americana **"Patriot"**.
- Em 26/02/1991, houve uma **falha catastrófica** no emprego dos "Patriot" contra um ataque realizado contra a base norte-americana em Dharan (Arábia Saudita), resultando na morte de 28 militares e ferindo outros 90.
- Qual a razão da falha?
 - **Acumulação de erro em operações aritméticas** no computador de controle de lançamento do míssil, causada pelo **emprego inadequado** do sistema **"Patriot"**.

O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991

- O sistema de mísseis antimísseis "**Patriot**" é composto por:
 - Uma **estação de radar**, para detecção, aquisição e disparo;
 - Uma **estação de comando e controle**, para **disparo automático** ou **manual** dos mísseis; e
 - Oito **lançadores de mísseis**.
- O "Patriot" foi projetado no final da década de 1960 para utilização em uma guerra na Europa, a fim de destruir aeronaves e mísseis de cruzeiro soviéticos voando a, no máximo, 2 Mach:
 - O sistema não deveria operar por mais do que algumas **poucas horas** no mesmo local, para evitar sua localização pelas forças inimigas.

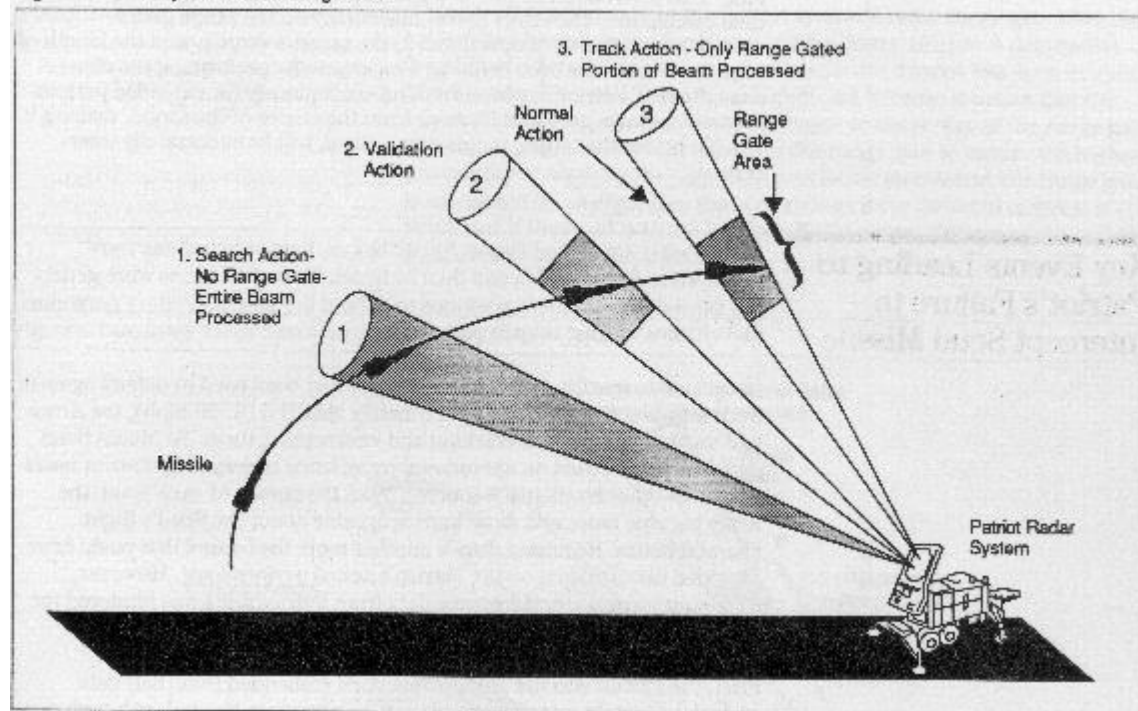
O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991



O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991

- Diagrama de funcionamento do sistema "**Patriot**":
 - Baseado em cálculos para determinar a **janela de engajamento** com base na **velocidade do alvo** e no **tempo de detecção do alvo**.
 - De forma a se garantir a **maior probabilidade de destruição**, o alvo deve encontrar-se no **meio** da janela.

Figure 3: Correctly Calculated Range Gate



O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991

- O computador usado na **estação de comando e controle** utiliza um relógio que mede o tempo como um **número inteiro de 24 bits**, em unidades de **décimo de segundo** (0,1 s).
- Para se realizar o cálculo da **distância** (necessário para se determinar a **janela de engajamento**), o tempo é convertido para representação de **números reais em ponto-fixo com 24 bits**, usando **números binários**;
- A **velocidade** do alvo é obtida por medição do tempo relativo entre as varreduras do radar e sua posição angular.

O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991

- No entanto, o número **0,1** não tem representação exata em binário:

$$(0,1)_{10} = (0,00011001100110011001100110011001100 \dots)_2$$

- Ao converter para ponto-fixo, apenas 24 bits serão armazenados:

$$(0,000110011001100110011001100)_2 = \\ 0,09999990463256835900000000 \neq 0,1$$

de onde pode-se calcular que o **erro absoluto ϵ na representação de 0,1 em binário, em 24 bits em ponto-fixo** é igual a

$$\epsilon = 0,1 - 0,09999990463256835900000000 =$$

$$\boxed{9,5367431646176115 \times 10^{-8}}$$

O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991

- Assim, a cada décimo de segundo t convertido para ponto-fixo, o tempo em segundos é, na verdade, um número na forma

$$\boxed{\text{fixo}(t) = t(1 - \epsilon)}.$$

- Por exemplo, após **8 h** de operação, o registrador de tempo contém o número inteiro **288000** (em décimos de segundo), equivalente **28800 s**.
- Porém, devido ao erro na representação em ponto-fixo, o tempo a ser armazenado como um número real em ponto-fixo é igual a

$$\text{fixo}(28800) = 28800(1 - \epsilon) \cong \mathbf{28799,9725341796880}.$$

O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991

- Essa constatação não é de espantar já que a **quantidade de bits** usada para representar qualquer valor numérico real num computador é **finita**.
- Devido a esse fato, a **quantidade de números reais representáveis num computador** também é **finita**.
- Logo, diz-se que ao se representar um número real num computador, acabará ocorrendo um **arredondamento** e, por conseguinte, há um **erro** associado à representação daquele número real!
- **Toda operação envolvendo números reais num computador é feita na presença de erros de arredondamento!**

O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991

- Agora, como a expressão $t(1 - \epsilon)$ é diretamente proporcional a t , pode-se inferir, portanto, que quanto mais tempo o sistema estiver em uso, **maior será o erro induzido na representação em ponto-fixado de t !**
- Qual o impacto desse erro?
 - O tempo é usado para se determinar a altitude de um míssil ou aeronave: $y = vt$.
 - Se esse míssil ou aeronave estiver se deslocando a uma velocidade muito alta, então os erros de arredondamento presentes em t e em v , farão com que a janela seja calculada de forma errada, levando à falha na interceptação.

O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991

- Em 11 de fevereiro de 1991, detectou-se que após **8 h** de uso contínuo, a janela deslocava-se **20%** para baixo, mas com o alvo ainda dentro dela.
- Conforme o fabricante, um deslocamento de mais de **50%** da janela causaria a não-deteção do alvo e, conseqüentemente, o míssil "Patriot" não seria disparado contra o alvo.
- Por extrapolação, concluiu-se que ao se utilizar o sistema por mais de **20h** contínuas, a janela sofreria um deslocamento superior a 50%.
- A tabela a seguir, segundo [GAO/IMTEC-92-26, 1992], mostra o efeito do **erro cumulativo no tempo** no cálculo da **janela de engajamento**, em termos do **deslocamento espacial** da janela, considerando uma velocidade terminal do "Scud" de **5,88 Mach**:

O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991

- Efeito do **erro cumulativo no tempo** no cálculo da **janela de engajamento**, em termos do **deslocamento espacial** da janela:

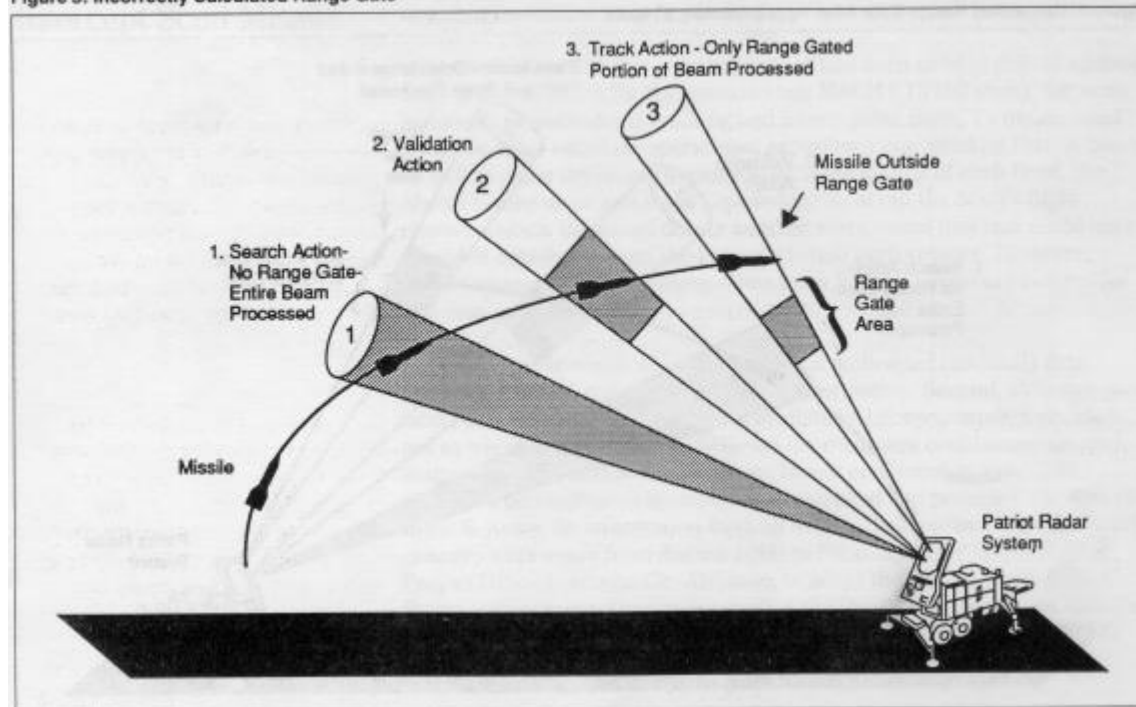
Tempo [h]	Tempo [s]	Tempo ponto-fixado [s]	Erro [s]	Deslocamento da janela [m]	
0	0	0	0	0	
1	3600	3599,9966	0,0034	7	
8	28800	28799,9725	0,0275	55	20%
20	72000	71999,9313	0,0687	137	50%
48	172800	172799,8352	0,1648	330	
72	259200	259199,7528	0,2472	494	
100	360000	359999,6667	0,3433	687	

Fonte: GAO/IMTEC-92-26, 1992.

O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991

- Janela de engajamento calculada após **100 h de operação contínua.**
- A janela é calculada de forma errada e, como o alvo está fora da janela, o **"Patriot"** não será disparado!

Figure 5: Incorrectly Calculated Range Gate



O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991

- Nesse dia, a bateria "Patriot" em Dharan estava operando a mais de **100 h** contínuas!
- Relembrando: em 100 h de operação, o erro acumulado será de **0,3433 s**.
- O deslocamento vertical é calculado como $\Delta y = v\epsilon$, onde $v = 5,88 \text{ Mach} = 2001,17 \text{ m/s}$. Como o valor máximo permitido para o deslocamento era de 137 m, não havia a menor possibilidade da bateria "Patriot" destruir o "Scud", pois um erro igual ou superior a 0,3433 s necessariamente implica em um deslocamento

$$\Delta y \geq 687 \text{ m} > 137 \text{ m!}$$

O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991

- Como resultado dessa falha catastrófica, o míssil “Scud” atingiu a base ocupada por tropas da Guarda Nacional da Pensilvânia, matando 28 soldados e ferindo outros 90.
- Uma nova versão do “software” de controle chegou à bateria “Patriot” em Dharan algumas horas depois do ataque:
 - Essa versão **zerava o registrador de tempo após algumas horas**, controlando dessa forma o erro induzido pelo arredondamento de um número inteiro num número real de ponto-fixa.

OS MÍSSEIS “PATRIOT” NA Iª GUERRA DO GOLFO

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO
2. OS MÍSSEIS BALÍSTICOS TÁTICOS “SCUD”
3. O ATAQUE DO DIA 26 DE FEVEREIRO DE 1991
4. **CONCLUSÕES**

CONCLUSÕES

1. Como é sabido, qualquer operação aritmética efetuada em **precisão finita é feita na presença de erros de arredondamento.**
2. No caso específico do sistema “Patriot”, esses erros eram exacerbados pelo fato do relógio marcar o tempo em **décimos de segundo.** Essa escolha, ainda que possa ser justificada em termos de menor custo e/ou facilidade de apresentação de informação para o operador do sistema, **é a pior escolha possível em termos numéricos.**
3. A falha catastrófica no sistema "Patriot" no dia 26/02/1991 foi causada pela **utilização de um sistema computacional em condições para os quais não havia sido planejado.**

BIBLIOGRAFIA

PATRIOT Missile Defense: Software Problem Led to System Failure at Dhahran, Saudi Arabia. IMTEC-92-26. Washington: GAO, 1992.

FETTER, S. A Ballistic Missile Primer. 1998.