

Black-Hole Effect: uma Ameaça para Voos Visuais Noturnos

Black-Hole Effect: a Threat to Night Visual Flights

Carlos André Vaz Junior

Especialista em Gerenciamento de Segurança de Processos

Engenheiro de Segurança do Trabalho, Engenheiro Químico e Doutor em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola de Química / Universidade Federal do Rio de Janeiro

Endereço: Sala E-209, Departamento de Engenharia Química, Bloco E, Centro de Tecnologia, UFRJ, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

E-mail: cavazjunior@eq.ufrj

RESUMO

Ao longo dos anos diversos acidentes aéreos foram registrados em função de fatores contribuintes específicos dos voos visuais no período noturno. Apesar disso, diversos pilotos, controladores e empresas operadoras continuam acreditando que voar a noite é igual a voar de dia. Não é! O voo sob regras visuais (VFR) se baseia, como o próprio nome diz, em “ter contato visual”, ou simplesmente: “ver”. E essa é o ponto: a visão humana tem sua capacidade reduzida em ambientes com baixa luminosidade. Noites sem Lua, voos sobre regiões inabitadas ou sobre a água, céu noturno nublado, tudo isso são fatores complicadores para o voo visual. Entre as várias ilusões de ótica que podem prejudicar o desempenho de pilotos nessas condições está o Black-Hole Effect, que ocorre quando as luzes da pista do aeroporto de destino são a única referência visual. Uma ilha iluminada cercada da mais profunda escuridão.

Pesquisas mostram que tripulações sob este efeito tendem a acreditar estar voando mais alto do que realmente estão. Com essa crença o piloto aumenta a razão de descida, empregando uma rampa mais próxima ao solo. Graças a ilusão de ótica, o piloto coloca a aeronave para voar perigosamente baixo, elevando o risco de CFIT especialmente em regiões montanhosas. Foi isso que aconteceu em 6 de fevereiro de 2007 no estado americano de Montana, levando a colisão contra o solo de um Beech 200 King Air, prefixo N45MF. O relatório final da investigação deste acidente foi aqui analisado, com especial atenção para o possível papel do Black-Hole Effect na dinâmica dos acontecimentos.

Palavras-Chave: Black-Hole Effect, voo noturno, voo visual, VFR, comportamento humano, segurança na aviação

ABSTRACT

Over the years, several air accidents have been recorded due to factors specific to visual flights at night. Despite this, many pilots, controllers and operating companies continue to believe that flying at night is the same as flying during the day. It is not! Flight under visual rules (VFR) is based, as the name suggests, on “having visual contact”, or simply: “seeing”. And that's the point: human vision has reduced capacity in low-light environments. Moonless nights, flights over uninhabited regions or over water, cloudy night skies, all of these are complicating factors for visual flight. Among the various optical illusions that can harm pilots' performance in these conditions is the Black-Hole Effect, which occurs when the runway lights at the destination airport are the only visual reference. An illuminated island surrounded by the deepest darkness. Research shows that crews under this effect tend to believe they are flying higher than they really are. With this belief, the pilot increases the rate of descent, using a ramp closer to the ground. Thanks to the optical illusion, the pilot places the aircraft to fly dangerously low, increasing the risk of CFIT especially in mountainous regions. This is what happened on February 6, 2007 in the American state of Montana, leading to a Beech 200 King Air, registration number N45MF, colliding with the ground. The final investigation report of this accident was analyzed here, with special attention to the possible role of the Black-Hole Effect in the dynamics of the events

Keywords: black-hole, night flight, visual flight, VFR, human behavior, aviation safety

1. INTRODUÇÃO

O voo noturno em condições visuais, em especial as aproximações para pouso, apresentam maior nível de risco em função das limitações da visão humana em ambientes com iluminação reduzida (WILSON, D., 2020). Casos de ilusões de ótica, resultando ou não em desorientação espacial, são reportados (TEIFER, F., SIKORA, I., E PARASKEVAS, A., 2023). Um tipo especialmente crítico de ilusão é aquela relacionada com fatores e condições que afetam a capacidade dos pilotos para avaliar adequadamente sua posição espacial em termos de altura em relação ao terreno, distância até a pista e ângulo da rampa ideal de descida (FLIGHT SAFETY FOUNDATION, 2000). A falsa percepção de estar voando muito alto pode levar o piloto a conduzir uma rampa de aproximação muito baixa, elevando o risco de colisão contra o terreno. Um tipo de ilusão que pode levar a este comportamento é o Black-Hole Effect ou Black-Hole Illusion (TEIFER, F., SIKORA, I., E PARASKEVAS, A., 2023). As condições principais para geração de Black-Hole Effect são o voo noturno, em noite sem Lua, sobre terreno com pouca ou nenhuma ocupação humana, e realizando aproximação visual para aeroporto geograficamente isolado. Nessa condição de ausência de luzes no terreno ao redor da aeronave e do aeroporto, as luzes da pista e do aeroporto de destino se tornam as únicas referências visual para o piloto em descida. Sob influência do Black-Hole Effect o tripulante torna-se incapaz de medir corretamente sua altura em relação ao solo e seu afastamento em relação a cabeceira da pista, levando a acreditar que esteja voando alto demais. Ao corrigir o suposto desvio, o piloto passa a voar demasiadamente próximo do solo, aumentando a chance de CFIT (Controlled Flight Into Terrain), especialmente quando sobre terreno montanhoso. Este é o caso do acidente descrito neste texto. Informações sobre ilusões de ótica e Black-Hole Effect são apresentadas em dois itens do texto, assim como reflexões sobre os fatores contribuintes para este evento. A descrição do acidente foi obtida em relatório oficial de investigação publicado em 2009 pela NTSB (National Transportation Safety Board)(NTSB, 2009).

2. O ACIDENTE

O evento aqui descrito ocorreu em 6 de fevereiro de 2007, envolvendo colisão contra montanhas durante voo sob regras visuais (VFR: Visual flight rules) noturno no estado americano de Montana (NTSB, 2009). A aeronave envolvida era do modelo Beech 200 King Air, prefixo N45MF, sendo comandada por um único tripulante.

A aeronave decolou do aeroporto Great Falls International Airport, em Great Falls, Montana, às 20h40 do dia 6 de fevereiro de 2007. O destino era o aeroporto de Bozeman Yellowstone International Airport (BZN), na época denominado de Gallatin Field Airport, localizado em Belgrade, também no estado de Montana (Figura 1).



Figura 1: Localização dos aeroportos de origem e destino, e do ponto de colisão contra o terreno

Fonte: adaptado de Google Maps

Tratava-se de voo por instrumentos com extensão de 103 milhas náuticas, ou aproximadamente 190 quilômetros. Às 20h56 (16 minutos após a decolagem) o piloto declara, para o controle de tráfego aéreo, estar visual com a pista de destino, e pede para iniciar descida já sob regra VFR. Oito minutos depois (21h04), já tendo iniciado descida, a aeronave colidiu contra o relevo da região a uma distância de 13 milhas náuticas (24 quilômetros) do aeroporto de destino (Figuras 1 e 2). O choque ocorreu aos 5620 pés.



Figura 2: Destaque do local da colisão

Fonte: adaptado de Google Maps

O item seguinte apresenta os principais diálogos realizados entre a aeronave e os órgão de controle, conforme relatório da NTSB (2009).

2.1 Diálogos entre a aeronave e os órgãos de controle de tráfego

Dia 06 de fevereiro de 2007:

19h59: piloto entra em contato por telefone com Great Falls Automated Flight Service Station (AFSS) e obtém uma breve descrição do plano de voo IFR para BZN. Segundo os investigadores, o piloto não se interessou em ouvir sobre as condições meteorológicas durante essa ligação.

20h10: piloto faz novo contato telefônico com Great Falls AFSS. Nesta ligação o tripulante preencheu dois planos: “Great Falls para BZN” e “BZN para Great Falls”. Ou seja, os planos de ida e volta.

20h39: Great Falls Air Traffic Control Tower (ATCT) libera decolagem da aeronave Beech 200 King Air, prefixo N45MF.

20h42: Transferido da ATCT para o controle de tráfego da área após a decolagem, o controle identifica a aeronave no radar, liberando então para prosseguir subida até 15.000 pés.

20h56: Neste momento a aeronave se encontra 42 milhas náuticas (aproximadamente 77,8 quilômetros) ao norte do aeroporto de destino, e 30 milhas náuticas (aproximadamente 55,6 quilômetros) ao norte do local da colisão. Sob vigilância radar o controle libera descida, a critério do piloto, de 15.000 pés para 13.000 pés. O piloto reconhece a liberação para iniciar descida e então declara: “I’ve got the airport in sight at BZN requesting a visual approach” (NTSB, 2009).

21h00: O controle de tráfego libera o piloto para aproximação visual, aeroporto BZN. É possível, por meio do sinal de radar, confirmar que a aeronave já iniciou sua descida.

21h01:01: O controle informa serviço radar encerrado, e orienta o piloto a chamar a Torre de Controle de BZN.

21h01:21: Piloto chama a torre de controle de BZN: “BZN Tower, Lifeguard King Air 45MF”. O resto da transmissão é ininteligível.

21h01:38: O piloto faz nova transmissão por rádio para a torre de controle de BZN, mas novamente seu conteúdo é ininteligível. Aos investigadores a equipe de controladores de BZN declara ser frequente que transmissões de aeronaves naquela posição cheguem de modo ininteligível para a torre.

21h01:40: último sinal de radar é recebido pelo controle de tráfego aéreo. A aeronave estava 13 milhas náuticas (24 quilômetros) ao norte do local do acidente, com uma altitude de 11.300 pés. Em função do relevo da região, o radar do controle de tráfego só conseguia captar aeronaves acima de 11.000 pés. Na época do acidente a torre de controle de BZN não contava com sistema de radar.

21h04: colisão da aeronave contra montanha

3. PILOTO

O King Air era comandado por um único piloto. Com idade de 59 anos, contava com 17.608 horas totais de voo, sendo 1318 horas como PIC (Pilot in command) de aeronave modelo King Air 200. Havia sido contratado pela operadora da aeronave em 1999. A Tabela 1 detalha o tempo de voo do piloto ao longo dos últimos meses antes do acidente. A rotina de trabalho na última semana encontra-se detalhada na Tabela 2. Pela Tabela 2 é possível observar que este era o quarto turno seguido do piloto no horário de 19h00 às 07h00.

Tabela 1: Tempo de voo do piloto ao longo dos últimos meses antes do acidente

Fonte: NTSB (2009)

Período	Tempo de Voo
Últimos 6 meses	73,4 horas
Últimos 90 dias	66 horas
Últimos 30 dias	45 horas
Últimas 24 horas	25 minutos

Tabela 2: Rotina de trabalho do piloto ao longo da última semana

Fonte: NTSB (2009)

Dia / hora	Atividade	Detalhamento
01 de fevereiro	Folga	
02 de fevereiro, 19h00	Início do turno	Não voou neste turno
03 de fevereiro, 07h00	Final do turno	
03 de fevereiro, 19h00	Início do turno	Não voou neste turno
04 de fevereiro, 07h00	Final do turno	
04 de fevereiro, 19h00	Início do turno	Voou 0,8 horas
05 de fevereiro, 07h00	Final do turno	
05 de fevereiro, 19h00	Início do turno	Não voou neste turno
06 de fevereiro, 07h00	Final do turno	
06 de fevereiro, 19h00	Início do turno	Acidente às 21h04
07 de fevereiro, 07h00	Previsão para término do turno	

Segundo apuração dos investigadores da NTSB (2009), o piloto já havia voado na rota e estava “familiarizado com o terreno”.

4. AEROPORTO

O aeroporto de destino era o Bozeman Yellowstone International Airport (BZN), na época denominado de Gallatin Field Airport. Na data do acidente o campo contava, segundo relatório da NTSB (2009), com duas pistas:

12/30: dimensões: 9003 por 150 pés

03/21: dimensões: 2650 por 75 pés

Atualmente o aeroporto conta ainda com uma terceira pista:

11/29: dimensões: 5050 por 75 pés.

A pista 12/30, com maior extensão, já contava, na época do acidente, com os seguintes recursos de sinalização luminosa:

MALSR: medium-intensity approach lighting system (ALS)

VASI: visual approach slope indicator

Detalhes sobre estes sistemas podem ser encontrados em FAA (2024) e no texto de Adrian A. Eichhorn (2005). Sobre o sistema VASI, a FAA (2025) declara que:

“The VASI is a system of lights so arranged to provide visual descent guidance information during the approach to a runway. These lights are visible from 3-5 miles during the day and up to 20 miles or more at night. The visual glide path of the VASI provides safe obstruction clearance within plus or minus 10 degrees of the extended runway centerline and to 4 NM from the runway threshold. Descent, using the VASI, should not be initiated until the aircraft is visually aligned with the runway. Lateral course guidance is provided by the runway or runway lights.”

A carta de voo visual (VFR Chart) da região de BZN permite observar o relevo complexo no setor norte e noroeste do campo, com picos de 9440 e 9520 pés (Figura 3).

A MSA (Minimum Safe Altitude) informada pela carta para pouso por instrumentos, pista 12, em vigor em fevereiro de 2025, é de 10.600 e 10.900 pés nos setores norte e noroeste do aeroporto em um raio de 25 milhas náuticas (Figura 4). A carta RNAV (RNP) Z RWY 12, em vigor em fevereiro de 2025, informa MSA de 12.200 pés em todos os setores, dentro de um raio de 25 milhas náuticas. As cartas também informam que a elevação do campo é de 4473 pés (msl). Na época do acidente a MOCA (minimum obstruction clearance altitude) era de 9100 pés (NTSB, 2009)



Figura 3: Carta de voo visual (VFR Chart), região de Bozeman Yellowstone International Airport

Fonte: adaptado de skyvector.com

LOC I-BZN 109.3	APP CRS 123°	Rwy Idg 8994 TDZE 4443 Apt Elev 4473
---------------------------	------------------------	--

ILS or LOC RWY 12
BOZEMAN YELLOWSTONE INTL (BZN)

RADAR required for procedure entry at BRGR INT.

 Circling NA to Rwy 3-21 and 11-29. DME from BZN VOR/DME. DME use requires simultaneous reception of I-BZN and BZN DME. For Inop ALS, increase S-LOC 12 Cat C/D visibility to 2 SM.

MALSR

MISSED APPROACH: Climb to 5200 then climbing right turn to 9000 on heading 250° and on BZN VOR/DME R-223 to BRGR INT/BZN 1.5 DME and hold. Continue climb-in-hold to 9000.

ATIS 135.425	BIG SKY APP CON* 118.975 226.675	BOZEMAN TOWER* 118.2 (CTAF) 0	GND CON 121.8	UNICOM 122.95
-----------------	-------------------------------------	----------------------------------	------------------	------------------

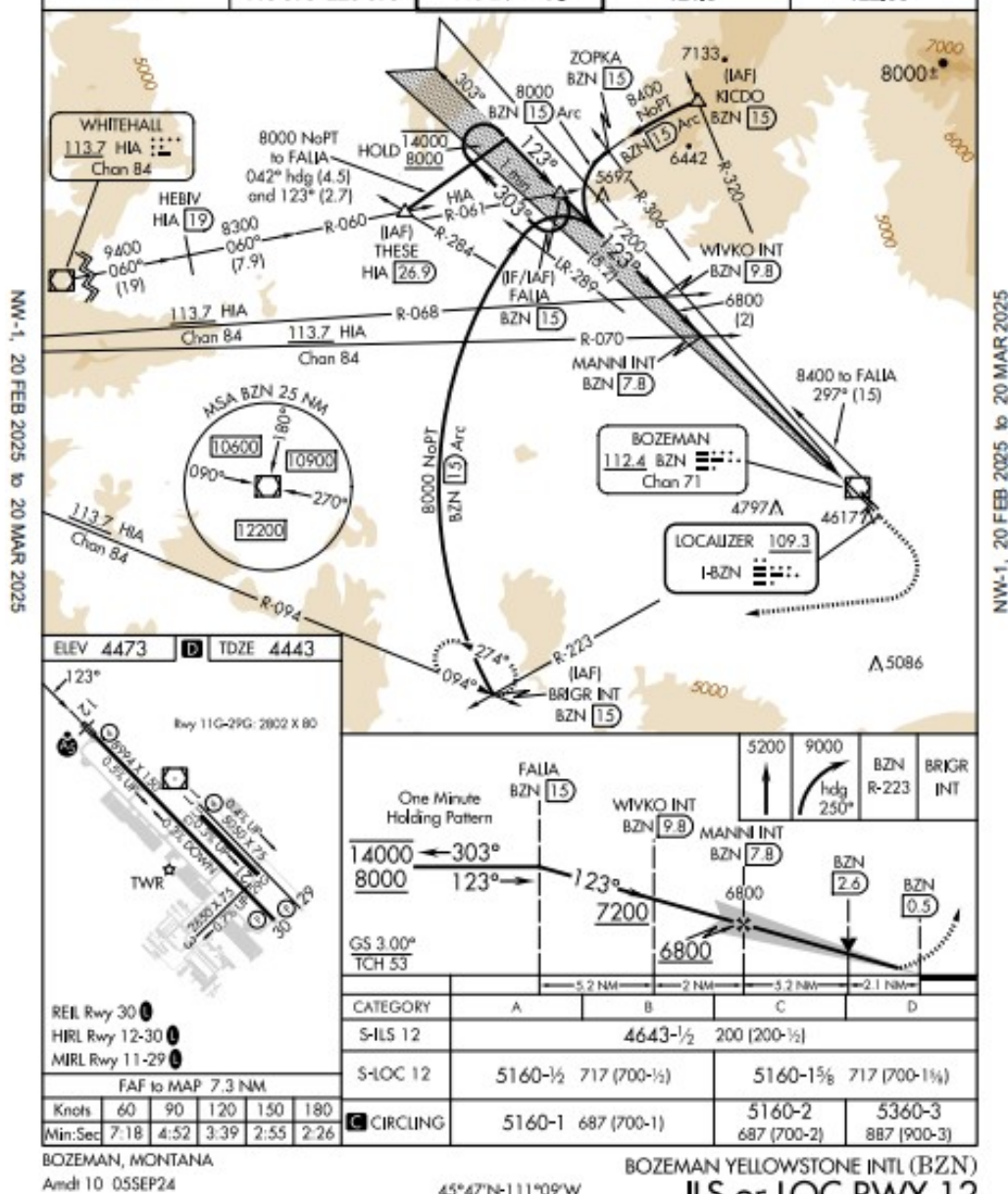


Figura 4: Carta de aproximação por instrumentos (Bozeman Yellowstone International Airport)

Fonte: adaptado de skyvector.com

5. METEOROLOGIA

Informações meteorológicas da origem e destino nos horários aproximados do voo (decolagem 20h40, colisão: 21h04).

a) Great Falls Airport (origem)

Horário: 19h53

Vento: direção: 040°, com 7 nós de velocidade

Visibilidade: 7 milhas náuticas

Nuvens: nublado (overcast), 500 pés (agl)

b) Gallatin Field Airport (BZN) (destino)

Horário: 20h56

Vento: direção: 300°, com 4 nós de velocidade

Visibilidade: sem restrições

Nuvens: nublado (overcast), 11.000 pés (agl)

Horário: 21h45

Vento: direção: 260°, com 4 nós de velocidade

Visibilidade: sem restrições

Nuvens: nublado (overcast), 11.000 pés (agl)

Lua: visível no horizonte a partir de 22h34

6. ILUSÕES DE ÓTICA

Para ilustrar como as ilusões de ótica podem agir na compreensão e interpretação cerebral da imagem formada na retina, este item apresenta algumas imagens de interesse. A compreensão cerebral por vezes se distancia bastante daquilo que foi inicialmente captado pela retina, como pode ser visto aqui.

a) cubo aramado

A Figura 5A apresenta um cubo na sua representação aramada, sem sombras ou outros detalhes. Já a Figura 5B apresenta um cubo visto de fora, com sua face frontal “mais próxima” do leitor preenchida em azul, e as faces superior e lateral direita se “afastando para dentro do papel”. Finalmente, a Figura 5C representa um cubo visto de cima, com a sua face superior em azul-claro, “mais próxima do leitor”, enquanto as faces laterais estão preenchidas em azul mais escuro. Note que a estrutura dos três cubos é sempre a mesma: o aramado da Figura 5A. As imagens B e C apenas receberam laterais preenchidas.

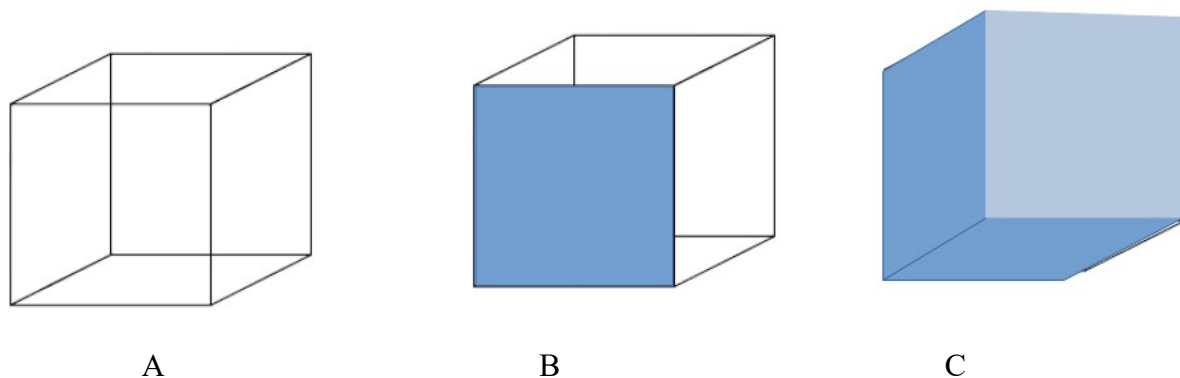


Figura 5: Cubo e suas diferentes perspectivas

Fonte: adaptado de: WILSON, D., 2020

Essa imagem foi construída a partir de exemplo que aparece no livro Dale Wilson (2020). Ao olhar para a representação aramada do cubo da Figura 5A faltam referências visuais para que se possa concluir a posição exata do cubo em relação ao papel. O cubo pode estar sendo visto de frente, tal qual aquele representado na imagem B, ou sendo visto de cima, como na imagem C. A diferença entre a representação aramada e as duas seguintes é a presença, ou ausência, de faces preenchidas. Quanto mais detalhes forem acrescentados, mais exata será nossa percepção de volume a partir de uma imagem representada em uma folha de papel de duas dimensões. Preencher todas as faces, aplicar sombras, tudo isso melhoraria cada vez mais nossa compreensão e visualização. Deste modo, são as referências visuais que faltavam para que o cérebro pudesse desenvolver um senso de profundidade, ou uma visão de perspectiva, em relação a representação do cubo. A representação aramada carece de referências.

Olhando novamente a imagem A é possível “se forçar” a imaginar esse cubo nas duas posições já apresentadas. Possivelmente uma dessas posições (B ou C) seja mais fácil para o leitor visualizar do que a outra, mas ambas são possíveis com um pouco de esforço. O importante aqui é entender que foi a falta de referências visuais que fez com que a percepção de profundidade fosse prejudicada, tal qual no Black-Hole Effect na aviação.

Antes de passar para o exemplo seguinte cabe uma última observação: é óbvio que qualquer representação na superfície plana de uma folha de papel é feita em duas dimensões. Contudo, já olhamos para a Figura 5 buscando “enxergar objetos em três dimensões”. Isso ocorre pois o cérebro humano é naturalmente treinado para atuar em um mundo de três dimensões. Com breves traços que induzam alguma noção de profundidade, o cérebro completa a imagem e cria um modelo mental em três dimensões. Esse modelo mental pode ser baseado em informações incompletas (imagem A) ou em representações com mais referências (imagens B e C). A representação não precisa ser completa para o cérebro “adivinhar” o que ela representa.

b) tabuleiro

A Figura 6 representa uma ilusão de ótica bastante surpreendente. Por meio dela é possível perceber como a construção de uma imagem mental, a partir do que foi captado pela retina, é profundamente dependente não só das referências visuais presentes na imagem, mas também dos modelos mentais preexistentes. De certo modo, “enxergamos o que queremos” (WILSON, D., 2020). A Figura 6 aparece no livro de David Moriarty (2015) e em diversas outras referências. Olhando para a imagem responda: qual o quadrado mais escuro, aquele ocupado pela letra A ou aquele ocupado pela letra B? Espero que a resposta seja óbvia para o leitor: o quadrado com a letra A é muito mais escuro! Ao longo de anos venho usando essa imagem em diferentes turmas de graduação para as quais dou aula, e nunca tive uma resposta contrária. Eu, mesmo tendo olhado essa mesma figura dezenas de vezes, não consigo ver diferente: é óbvio que a letra A encontra-se em um quadrado mais escuro que o da letra B!

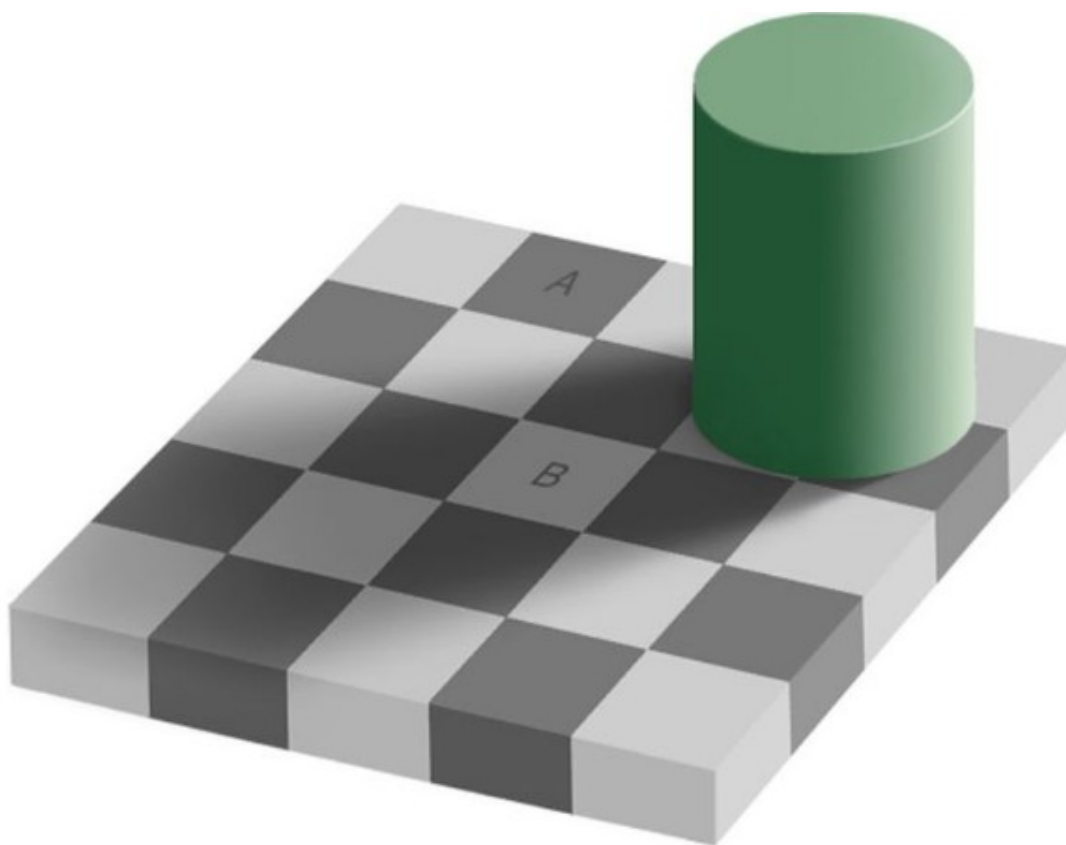


Figura 6: Tabuleiro

Fonte: MORIARTY, D., 2015

Infelizmente isso não é verdade. Se removermos todo contexto e referências visuais presentes na Figura 6, deixando visíveis somente os dois quadrados de interesse, a realidade aparece: ambos são iguais! Confira na Figura 7.

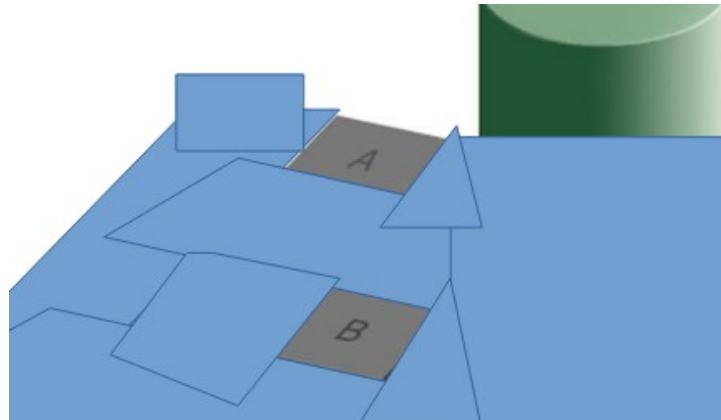


Figura 7: Tabuleiro tampado

Fonte: Adaptado de MORIARTY, D., 2015

A diferença entre as duas imagens é apenas o contexto, o entorno, a periferia na qual os dois quadrados estão inseridos. Em função do contexto o cérebro completou a imagem gerada pela retina com informações derivadas de modelos mentais preexistentes. Esses modelos mentais foram gerados ao longo da nossa experiência de vida na Terra. Seja o padrão quadriculado xadrez, seja o efeito das sombras sobre os objetos. Quando eliminamos todas as informações extras, retiramos as referências, nosso cérebro enxerga aquilo que efetivamente está sendo captado pela retina: dois quadrados com o mesmo tom de cinza. Neste caso não são aplicados filtros mentais. Moriarty (2015) discute como percebemos o mundo não apenas em função daquilo que captamos na retina, mas também pelo que completamos e ajustamos por meio de filtros e modelos mentais.

c) o que você enxerga primeiro?

A Figura 8 apresenta um dos tipos de ilusão de ótica mais conhecidos. Existem dezenas de imagens similares pela internet. Apresento aqui apenas uma, que considero suficiente para o que desejo discutir. Olhando a Figura 8, o que você vê primeiro? A árvore? Os dois rostos? Tudo ao mesmo tempo? Depois que você conseguir localizar a árvore e os rostos na imagem, volte e olhe novamente. O que aconteceu? Provavelmente agora você vê os três instantaneamente, ficou muito mais fácil! Ou seja, o cérebro se acostumou a reconhecer o padrão de imagem depois de ter sido exposto uma vez. De certo modo a figura “perdeu a graça”. Trazendo esse exemplo para a aviação, esse é um dos motivos pelos quais o treinamento é importante. O treino expõe o cérebro a diferentes padrões (situações), e aos poucos torna o reconhecimento mais ágil. Mais especificamente no contexto do acidente aqui analisado, treinar para reconhecer Black-Hole Effect poderia ser o meio de prevenir esse tipo de ilusão? Talvez sim, mas infelizmente o treinamento não consegue eliminar por completo o papel dos filtros e modelos mentais. Volte agora na Figura 6. Você já sabe que os quadrados A e B apresentam a

mesma tonalidade de cinza, mas mesmo assim continua “enxergando” cada um com um tom diferente. Por mais que conheça a realidade, por mais treinado que esteja nisso, é incapaz de impedir a ação dos filtros mentais. É possível, infelizmente, que algumas das ilusões de ótica que afetam a segurança do voo se enquadrem neste segundo caso.



Figura 8: O que você vê primeiro?

7. BLACK-HOLE EFFECT

Ilusões de ótica são resultados de muitos fatores, e podem aparecer dos mais diferentes modos durante um voo (WILSON, D., 2020). Apesar de frequentemente inofensivas, essas ilusões podem resultar em acidentes catastróficos, especialmente quando resultam em desorientação espacial, com consequente perda de controle em voo (LOC-I: loss of control in flight); ou em falhas na correta avaliação da altura em relação ao solo, como no caso do Black-Hole Effect (ou Black-Hole Illusion). Este segundo caso não leva a perda de controle operacional, mas promove falhas na rampa de descida, levando o piloto a realizar uma aproximação baixa, muito próxima do terreno e, em casos extremos, tocar o solo antes de atingir a cabeceira da pista (TEIFER, F., SIKORA, I., E PARASKEVAS, A., 2023).

O erro na avaliação da altura em relação ao solo durante aproximações está frequentemente relacionado ao voo noturno, em noites sem Lua ou totalmente nubladas, e tendo como destino aeroportos em zonas pouco habitadas (FLIGHT SAFETY FOUNDATION, 2000). Aproximações noturnas sobre a água também podem criar o mesmo efeito visual. Essa falha na capacidade de avaliar corretamente a altura em relação ao solo, distância até o aeroporto e consequente rampa ideal de

descida, é denominada “Black-Hole Effect”, ou “Black-Hole Illusion” (FLIGHT SAFETY FOUNDATION, 2000) (TEIFER, F., SIKORA, I., E PARASKEVAS, A., 2023). Uma vez que a única referência visual que a tripulação conta nestes casos são as próprias luzes da pista ou do aeroporto de destino, existe clara falta de referências visuais. Com poucas referências o cérebro humano torna-se incapaz de medir corretamente as distâncias, ou seja, observa-se perda de percepção de profundidade. Ao ter sua interpretação de profundidade prejudicada, o piloto passa a acreditar que está voando mais alto do que deveria, tendendo a reduzir sua altitude. O piloto pode perceber o aeroporto, sua única referência visual, como estando mais próximo do que realmente está, reforçando ainda mais a ilusão que está voando alto demais. Acreditando estar excessivamente alto em relação ao solo e próximo demais da cabeceira da pista de destino, o piloto decide reduzir sua altitude e adotar uma rampa de planeio mais baixa (FLIGHT SAFETY FOUNDATION, 2000). Na prática, isso acaba por colocar a aeronave em uma rampa de aproximação perigosamente próxima do terreno. A ocorrência de CFIT (Controlled Flight Into Terrain) passa então a ser uma ameaça real (TEIFER, F., SIKORA, I., E PARASKEVAS, A., 2023). Em casos extremos o piloto que sofre do efeito de Black-Hole pode levar sua aeronave a colidir contra o terreno escuro anterior a pista, criando a imagem de que a aeronave tenha sido “atraída pelo buraco-negro”.

Patterson, Arnold e Williams (2013) apresentam possível explicação para este comportamento humano. Segundo os autores, em voos diurnos sob regras visuais (VFR) os pilotos desenvolvem o hábito de observar a linha do horizonte para entender seu próprio posicionamento espacial. Um horizonte horizontal e alinhado ao centro indicaria um voo nivelado. Quando esse horizonte começa a parecer estar se movendo para cima, isso indica que o bico da aeronave está sendo deslocado para baixo (“picado”), ou seja, proa está sendo abaixada, em direção ao solo. Por outro lado, se o horizonte parecer estar se movendo para baixo, isso indica que o bico da aeronave está sendo deslocado para cima da linha atual de voo (“cabrado”), com a proa sendo levantada. Em voos sobre regras visuais noturnos pode se tornar impossível definir o horizonte natural, especialmente em noites mais escuras, sem Lua. Céu nublado, terrenos não habitados ou voo sobre a água também tendem a impedir o piloto de enxergar a linha do horizonte. Neste caso, uma vez estando visual com a pista do aeroporto de destino, que mais parece uma ilha de luzes no meio de um espaço escuro, o piloto passaria a usar a linha da cabeceira da pista como sua “linha do horizonte”. Apesar de funcionar em um primeiro momento, especialmente quando a aeronave já está alinhada com a pista em uma longa final para pouso, essa tendência cria uma armadilha: a medida que a aeronave se aproxima da pista a linha da cabeceira se desloca para baixo no referencial do piloto. Note que a linha do horizonte natural não se move na medida em que a aeronave voa em direção a ela, mas a linha da cabeceira da pista sim. Uma vez que o tripulante está usando a linha da cabeceira como horizonte, e esta se move para baixo, o piloto, por instinto, entende que a aeronave está adotando um movimento “cabrado”, ou seja,

elevando a proa. Elevar a proa não é a atitude desejada para uma aeronave em aproximação, logo, o piloto corrige essa ação baixando o nariz da aeronave (movimento “picado”), recolocando a linha da cabeceira (seu horizonte) na sua posição original. A repetição desse movimento intuitivo, ocasionada pela Black-Hole Illusion, faz com que a aeronave voe em uma rampa de aproximação cada vez mais próxima do solo (PATTERSON, F.R., ARNOLD, R.D., WILLIAMS, H.P., 2013).

Operadoras aéreas precisam avaliar a exposição de suas tripulações aos riscos de ilusões de ótica em suas rotas (FLIGHT SAFETY FOUNDATION, 2000). Operações noturnas, especialmente para destinos isolados ou próximos de grandes faixas de água podem ser especialmente sujeitas ao Black-Hole Effect. Tripulações precisam ser treinadas para reconhecer e entender os fatores e condições que causam ilusões de ótica, assim como seus efeitos e consequências para segurança (FLIGHT SAFETY FOUNDATION, 2000).

A Flight Safety Foundation (2000) destaca que, durante voos noturnos, sempre que uma aproximação por instrumentos estiver disponível, essa deve ser preferencialmente usada pelas tripulações. Evitar aproximações visuais durante voos noturnos é uma forma eficaz para reduzir o risco gerado pelas ilusões de ótica. Quando aproximações de precisão não estão disponíveis, aproximações de não precisão, com apoio de sistemas VASI (Visual Approach Slope Indicator) ou PAPI (Precision Approach Path Indicator) já colaboram no aumento da segurança operacional noturna (FLIGHT SAFETY FOUNDATION, 2000). Uma vez que o voo por instrumentos é, atualmente uma opção viável para muitos aviadores, evitar transições muito cedo do voo por instrumento em rota para aproximações visuais é outra recomendação da Flight Safety Foundation (2000) no sentido de reduzir os riscos causados pelas ilusões de ótica.

Além do voo visual em noite escura, sobre terreno com ausência de referências visuais, onde o aeroporto se torna a única referência no solo, outros fatores podem colaborar na geração de ilusões e agravar o Black-Hole Effect. Luzes de pista muito intensas, ou muito fracas, relações comprimento x largura de pista pouco usuais, presença de névoa ou neblina, pistas em aclive ou declive, são alguns exemplos de fatores contribuintes (FLIGHT SAFETY FOUNDATION, 2000)(WILSON, D., 2020). Estudo em simulador para tentar entender melhor como o efeito de Black-Hole ocorre foi realizado por Felix Teifer, Ivan Sikora, Alexandros Paraskevas (2023).

8. REFLEXÕES

Assume-se neste texto que a aeronave encontrava-se em perfeitas condições operacionais, e que o piloto detinha todo o controle da mesma até o momento da colisão. Ou seja, para a análise aqui proposta descartam-se possíveis falhas mecânicas, formação de gelo ou outros fatores que possam ter atuado. Entende-se, ainda, que o melhor esforço foi feito pelo piloto na condução da aeronave de forma adequada e segura, dentro de todos os padrões operacionais em vigor. Compreender e refletir

sobre os fatores contribuintes que levaram a este acidente visa exclusivamente a prevenção de eventos futuros.

8.1 Perfil Ideal de Descida e Altitude no Momento da Colisão

De acordo com o diagrama apresentado na carta de aproximação ILS or LOC RWY 12, em vigor em fevereiro de 2025 (Figura 9), é possível obter as seguintes informações:

- afastamento aproximado de 7,3 milhas náuticas da cabeceira: altitude não inferior a 6800 pés.
- afastamento aproximado de 9,3 milhas náuticas da cabeceira: altitude não inferior a 7200 pés.
- afastamento aproximado de 14,5 milhas náuticas da cabeceira: altitude não inferior a 8000 pés.

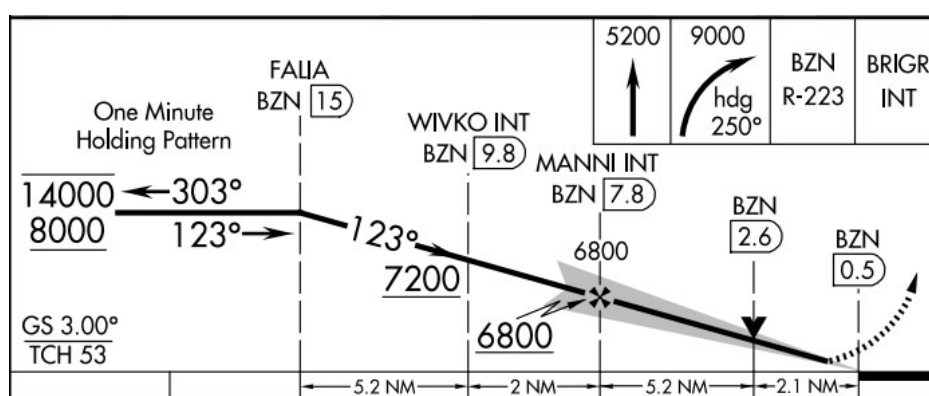


Figura 9: Recorte da carta de aproximação por instrumentos (Bozeman Yellowstone International Airport)

Fonte: adaptado de skyvector.com

Na mesma carta, observando o arco DME, é possível verificar indicação de manter altitude de 8000 pés no arco DME de 15 milhas náuticas (equivalente a aproximadamente 14,5 milhas náuticas da cabeceira da pista) (Figura 10). Essa informação é coerente com o perfil da Figura 9.

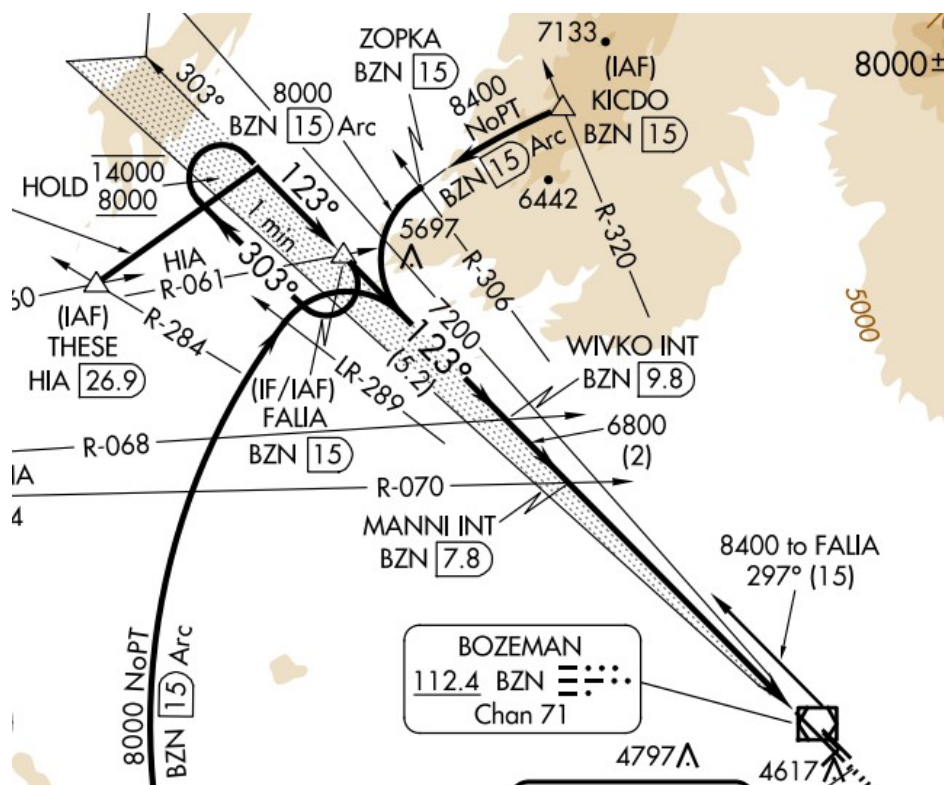


Figura 10: Recorte da carta de aproximação ar (Bozeman Yellowstone International Airport)

Fonte: adaptado de skyvector.com

A colisão contra o terreno aconteceu em altitude de 5620 pés, em um afastamento de 13 milhas náuticas do aeroporto. Considerando o perfil vertical da carta de ILS atualmente em vigor, a aeronave somente deveria atingir 5620 pés a uma distância menor do que 7,3 milhas náuticas da cabeceira da pista. Para uma aeronave afastada de 13 milhas náuticas, a altitude ideal seria quase 8000 pés. É certo afirmar que essa carta não estava disponível na época e que o piloto estava realizando uma aproximação visual, contudo, tomando-se por base o perfil de descida da carta hoje em vigor, percebe-se o quanto reduzida era a altitude da aeronave considerando o seu afastamento da pista. Uma aproximação baixa em um terreno com relevo crítico.

Mas quais os fatores contribuintes poderiam estar presentes para um piloto com mais de 17 mil horas de voo realizar uma aproximação tão baixa? Aproximações visuais para pouso são manobras treinadas desde o início da formação de um piloto, inclusive, muitos consideram esse tipo de operação mais natural e menos demandante da tripulação do que pousos por instrumentos. O que, então, pode explicar esse desvio?

O motivo exato não pode ser definido, mas a influência do Black-Hole Effect é uma possibilidade real. Quando estava a 42 milhas náuticas (aproximadamente 77,8 quilômetros) ao norte do aeroporto de destino o piloto declara ter avistado o aeroporto: “I’ve got the airport in sight at BZN requesting a visual approach” (NTSB, 2009). Quatro minutos depois, às 21h04, o controle de tráfego aéreo libera para continuar descida e aproximação visual para o destino. Considerando o terreno sobre o qual a

aeronave se encontrava, com ausência de atividade humana (Figura 2), é possível supor que a única, ou principal, referência visual do piloto era o próprio aeroporto iluminado ao longe. Essa “ilha de luz no meio de um mar de escuridão” condiz com a descrição do Black-Hole Effect. A forte iluminação do aeroporto pode ser fator agravante do fenômeno, como mencionado por Flight Safety Foundation (2000) e um dos fatores analisados no estudo de Felix Teifer, Ivan Sikora, e Alexandros Paraskevas (2023). A ideia é que “quanto mais intensas as luzes, mais íngreme será a aproximação”.

8.2 VASI

O sistema VASI poderia ter auxiliado na identificação do perfil baixo durante a aproximação? Em tese sim, pois em voos noturnos o sistema pode estar visível para aeronaves a uma distância de 20 milhas náuticas ou até mais (FAA, 2025), especialmente considerando a boa condição de visibilidade do aeroporto de destino (NTSB, 2009). Contudo, o VASI somente provê uma descida segura em relação aos obstáculos para aeronaves alinhadas no eixo da pista e com afastamento máximo de 4 milhas náuticas da cabeceira (FAA, 2025). Para aeronaves com afastamento maior e não alinhadas, não é possível garantir o distanciamento correto em relação ao relevo.

8.3 Obstrução das Luzes do Aeroporto e Visibilidade da Montanha

Considerando que a aeronave se chocou contra uma montanha durante a aproximação final, assume-se que o relevo encontrava-se entre a aeronave e o aeroporto. Logo, a medida que a aeronave executava seu perfil vertical de aproximação, em algum momento, mesmo que breve, a visão que o piloto tinha da cabeceira da pista deve ter ficado obstruída.

O relatório não apresenta informações sobre isso, de modo que não é possível garantir o que ocorreu. É possível que a obstrução tenha sido muito rápida, imediatamente antes da colisão, não oferecendo tempo suficiente para o piloto compreender o que estava acontecendo. É importante lembrar que, conforme detalhado por Vaz Junior (2025XXX) no estudo do acidente envolvendo aeronave prefixo N30DK (NTSB, 2006), e no acidente em Guarulhos, São Paulo, com aeronave prefixo PT-LSD (CENIPA, 1996), a visibilidade noturna de relevo não habitado fica fortemente prejudicada. No caso particular do acidente aqui tratado, a solicitação de passagem de IFR para VFR ocorreu aos 16 minutos de voo, tempo muito inferior aos 30 minutos necessários para uma melhor adaptação da visão humana ao ambiente noturno com pouca luminosidade (WILSON, D., 2020).

Seja como for, o modelo mental construído pelo piloto durante toda a descida, uma vez tendo estabelecido contato visual com o aeroporto já a partir de 20h56, era de estabelecer uma rampa direta para o aeroporto. Com contato visual com o aeroporto e em condições de voo visual (VFR), bastava seguir diretamente para a pista com o perfil de descida que lhe parecesse mais adequado. O surgimento, oito minutos depois (21h04) de uma montanha “no meio do caminho” vai contra o

modelo mental preestabelecido. A compreensão do que está acontecendo, do que significa ter deixado de ver a cabeceira da pista, e a tomada de decisão sobre o que fazer, demanda um tempo natural. A tendência humana normal é de se manter no modelo mental já em uso e nas decisões já tomadas (WILSON, D., 2020). Moriarty (2015) ressalta que, especialmente em momentos de elevada carga de trabalho, a tendência humana é manter-se na decisão já tomada. Comparando a informação radar de 21h01:40, na qual a aeronave se encontrava a 11300 pés de altitude, e o momento da colisão contra a montanha (21h04) a 5620 pés, encontra-se uma razão média de descida de quase 1900 pés por minuto, impondo janela temporal extremamente curta para o piloto reagir diante de qualquer anomalia.

8.4 Fadiga

No dia do acidente o piloto estava cumprindo seu quarto turno seguido no horário de 19h00 às 07h00. Embora sua carga horária de voos na última semana tenha sido baixa, o trabalho no turno noturno pode ser especialmente fadigante. O ajuste humano para dormir de dia e ficar acordado a noite não é trivial, tanto em função da influência natural que a luz promove nos sistemas regulatórios do sono, quanto em função da vida em sociedade ocorrer de dia (WILSON, D., 2020). Supor que o grau de cansaço provocado por um turno de 07h00 às 19h00 é idêntico aquele causado pelo turno de 19h00 às 07h00 é falso. Sabe-se que a fadiga prejudica na tomada de decisão e aumenta a tolerância ao risco (WILSON, D., 2020), contudo, a partir dos dados apresentados no relatório oficial da NTSB, é impossível afirmar que tenha sido fator contribuinte neste evento.

9. CONCLUSÃO

O voo visual noturno é profundamente diferente, e mais desafiador, que o voo visual diurno, e isso precisa ficar evidente. A recomendação da Flight Safety Foundation (2000) no sentido de retardar ao máximo a passagem de uma aproximação por instrumentos para uma aproximação visual precisa ser considerada. O voo visual noturno, especialmente em rotas já voadas antes, promove uma falsa sensação de segurança nas tripulações. Infelizmente a vista humana apresenta capacidade reduzida para ambientes com baixa luminosidade, como noites sem Lua, com o céu completamente nublado e voando em regiões não habitadas. Não é por acaso que este quadro descreve bem as condições básicas para a ocorrência do Black-Hole Effect, Esse efeito visual induz pilotos, mesmo os mais experientes, a realizar aproximações excessivamente próximas ao solo, elevando o risco de CFIT.

O Black-Hole Effect e outras ilusões de ótica são perigos reais que não podem ser ignorados pelos pilotos. Assumir que “isso nunca vai me acontecer”, ou que “eu saberia reconhecer que era uma ilusão”, não resolve o problema. Aprender com os acidentes passados e entender que somos todos igualmente sujeitos as ilusões de ótica é o primeiro passo para elevar a segurança das suas operações.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(CENIPA, 1996): Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos, “Relatório Final - Aeronave: PT-LSD. LR-25D”, 1996.

Disponível em: https://sistema.cenipa.fab.mil.br/cenipa/paginas/relatorios/rf/pt/PT-LSD_02-03-1996.pdf

(EICHHORN, A.A., 2000): Adrian A. Eichhorn, “N.I.G.H.T.”, 2005.

Disponível em: https://safepilots.org/library/contributed/Safety_GoodNIGHT_12-31-15.pdf

(FAA, 2024): Federal Aviation Administration, “VGLS - Medium Intensity Approach Light System with Runway Alignment Indicator Lights (MALSR)”, 2024

Disponível em: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/lsg/malsr

(FAA, 2025): Federal Aviation Administration, “Section 1. Airport Lighting Aids”, 2025.

Disponível em: https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap2_section_1.html

(FLIGHT SAFETY FOUNDATION, 2000): Flight Safety Foundation, “FSF ALAR Briefings Note 5.3 – Visual Illusions”, 2000.

Disponível em: https://flightsafety.org/wp-content/uploads/2016/09/alar_bn5-3-illusions.pdf

(MORIARTY, D., 2015): David Moriarty, “Practical Human Factors for Pilots”, Academic Press. ISBN 978-0124202443. 2015

(NTSB, 2006): National Transportation Safety Board, “Aircraft Accident Brief – Accident Number: LAX05FA015. Aircraft: Learjet 35A, N30DK”. 2006.

Disponível em: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/AAB0605.pdf>

(NTSB, 2009): National Transportation Safety Board, “Aviation Accident Final Report - Accident Number: SEA07FA051. Aircraft: Beech 200, N45MF”. 2009.

https://asn.flightsafety.org/reports/2007/20070206_BE20_N45MF.pdf

(PATTERSON, F.R., ARNOLD, R.D., WILLIAMS, H.P., 2013): Frederick R. Patterson, Richard D. Arnald, Henry P. Williams. “Visual Perspective Illusions as Aviation Mishap Causal Factors”, 17h Symposium on Aviation Psychology, 2013

Disponível em: https://corescholar.libraries.wright.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1081&context=isap_2013

(TEIFER, F., SIKORA, I., E PARASKEVAS, A., 2023): Felix Teifer, Ivan Sikora, Alexandros Paraskevas, “Black Hole Illusion in Aviation – A Simulator Experiment to Examine Predominant Criteria in a Real-Life Environment”. Human Factors in Transportation, Vol. 95, 636–644, 2023.

Disponível em: https://openaccess.cms-conferences.org/publications/book/978-1-958651-71-1/article/978-1-958651-71-1_63

(VAZ JUNIOR, C.A., 2025): Carlos André Vaz Junior, “Os Desafios do Voo Visual Noturno: limitações humanas”, 2025 XXXXXXXXXXXXXXXX

(WILSON, D., 2020): Dale Wilson, “Human Factors: Enhancing Pilot Performance”, Aviation Supplies & Academics Inc. ISBN: 978-1619549272. 2020.