

UMA MONTAGEM EQUATORIAL GERMÂNICA COMPUTADORIZADA PARA ENTUSIASTAS DA ASTRONOMIA AMADORA

CARLOS A. P. LEMES, JOÃO P. S. FONSECA

*Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás
Av. Universitária, n.º 1488, Setor Leste Universitário, Goiânia - GO, CEP: 74605-010, Brasil.
E-mails: carlosaugusto.paeslemes@gmail.com, jpsfonseca@ufg.br*

Abstract — Brazilian amateur astronomers face restrictions on the acquisition of equipment due to high costs and high custom taxes, which leads many of them to hand craft their own equipment attracted by lower costs, though some amateur astronomers also do so motivated by enthusiasm. Under the circumstances, a computerized German equatorial mount whose production involves popular manufacturing processes, materials and components that are easily found on the market was designed, simplifying execution and favouring enthusiasts interested in replicating the project. The designed mount has load capacity for up to 16 kg telescopes and can be operated in latitudes ranging from 0° to 80° , covering the entire national territory. It can be built for manual or motorized operation, and it is able to point automatically (GoTo function) when connected to a computer, even when the target is on the opposite side of the meridian. The equatorial mount's firmware, written in C/C++, is embedded in an Arduino Mega R3 that controls the equipment. The system was built and submitted to qualitative tests with a Newtonian telescope to ascertain its general usability, the performance of the GoTo function, and the performance of the tracking speeds for stars, planets and the Moon.

Keywords — German equatorial mount, mechanical design, systems integration, amateur astronomy, automation.

Resumo — Praticantes da astronomia amadora no Brasil enfrentam restrições para adquirir equipamentos devido ao alto custo e a impostos de importação elevados, o que leva muitos a fabricarem seus próprios equipamentos de maneira artesanal atraídos pelo custo mais acessível, embora alguns também o façam por entusiasmo. Diante desta situação, projetou-se uma montagem equatorial germânica computadorizada cuja produção envolve processos de fabricação, materiais e componentes facilmente encontrados no mercado, de forma a facilitar a execução e favorecer entusiastas interessados em replicar o projeto. A montagem projetada possui capacidade de carga para telescópios de até 16 kg, operação em latitudes variando de 0° a 80° , cobrindo todo o território nacional, pode ser operada de forma manual ou motorizada, e é capaz de apontar automaticamente para astros (função *GoTo*) quando conectada a um computador, mesmo quando o astro alvo está no lado oposto do meridiano. O *firmware* da montagem foi escrito em C/C++ e embarcado em um Arduino Mega R3 que controla o equipamento. O sistema concebido foi montado e submetido a testes qualitativos com um telescópio newtoniano para averiguar a usabilidade geral, o desempenho da função *GoTo*, e o desempenho das velocidades de rastreamento de estrelas, planetas e da Lua.

Palavras-chave — montagem equatorial germânica, projeto mecânico, integração de sistemas, astronomia amadora, automação.

1 Introdução

A montagem equatorial germânica é um equipamento sobre o qual monta-se um telescópio para apontá-lo na direção de alvos a serem observados, como planetas, estrelas e constelações, por exemplo. Existem essencialmente dois tipos de montagens para telescópios de pequeno porte como os usados pela maioria dos astrônomos amadores: as montagens altazimutais e as equatoriais. A diferença entre os dois tipos reside no sistema de coordenadas usado para localizar as estrelas ou alvos celestes, que dão nome a estes tipos de montagem. Uma montagem altazimutal utiliza o sistema horizontal de coordenadas, no qual as coordenadas Azimute e Altura são suficientes para marcar uma posição na esfera celeste. Uma montagem equatorial, por outro lado, utiliza o sistema equatorial de coordenadas, no qual a posição de um alvo na esfera celeste é definida por suas coordenadas de Ascensão Reta (AR), medida em ângulo horário de forma que 24 horas representam uma revolução completa, e de Declinação (Dec),

medida em graus de forma que $+90^\circ$ representa o polo norte celeste e -90° o polo sul celeste (Assafin, 2004). Neste sistema, o eixo de ascensão reta ou eixo polar é paralelo ao eixo de rotação da Terra, o que significa que este eixo é inclinado em relação ao plano horizontal de um ângulo igual ao módulo da latitude da posição geográfica onde o observador se encontra (Canalle e Matsuura, 2007). Como o movimento aparente diurno dos astros é causado principalmente pela rotação da Terra (Canalle e Matsuura, 2007), uma montagem equatorial requer que apenas o eixo polar seja acionado para rastrear o alvo, embora seja necessário movimentar ambos os eixos para apontar o telescópio para outros objetos (Bely, 2003). Uma montagem altazimutal, por outro lado, requer que ambos os eixos sejam movimentados tanto para apontar quanto para rastrear o alvo, e por não contar com um eixo paralelo ao eixo polar, a latitude do observador é usada no cálculo das velocidades de movimentação dos eixos (Bely, 2003). A Figura 1 ilustra as diferenças entre as montagens equatoriais e altazimutais quanto à disposição dos eixos, permitindo a comparação entre os dois tipos de montagem.

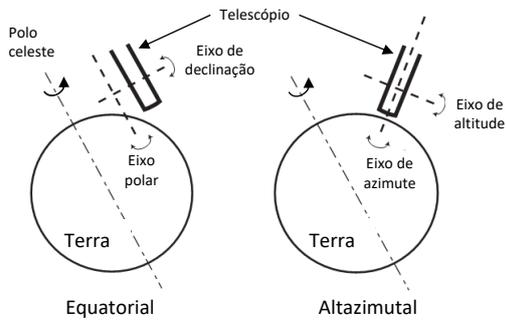


Figura 1. Princípio de funcionamento de uma montagem equatorial (à esquerda) e altazimutal (à direita). Imagem adaptada de Bely (Bely, 2003).

Uma vez que nas montagens equatoriais o movimento para rastrear alvos é em apenas um dos eixos, este modelo de montagem costuma apresentar melhor desempenho quando se deseja fazer astrofotografias, sendo preferido pelos astrônomos amadores. Devido ao arranjo de seus eixos, as montagens altazimutais apresentam um efeito denominado “rotação de campo” que faz com que a orientação de um objeto celeste (uma constelação, por exemplo) mude em relação ao campo de visão, impedindo o usuário de realizar astrofotografias de longa exposição a menos que sejam utilizados equipamentos auxiliares denominados *field derotators*, que literalmente giram a câmera enquanto a montagem rastreia um alvo. Por conta destas características, optou-se por projetar uma montagem equatorial germânica, além disso, deu-se preferência, sempre que possível, a materiais e processos de fabricação populares e acessíveis de modo a simplificar a execução do projeto.

Diferentemente das montagens *GoTo* comerciais, a montagem equatorial projetada não dispõe de banco de dados de objetos celestes, necessário para apontar automaticamente para astros ao usar a função *GoTo*, mas utiliza um *software* capaz enviar comandos com as coordenadas para as quais a montagem deve apontar, o Stellarium (stellarium.org), um planetário de código aberto amplamente utilizado por entusiastas da astronomia amadora. Esta abordagem simplifica muitos aspectos do projeto, uma vez que os cálculos das posições dos astros são executados em uma máquina com poder de processamento superior ao dos microcontroladores disponíveis em placas de desenvolvimento Arduino, e beneficia o usuário que pode utilizar diretamente o vasto banco de dados de objetos celestes do Stellarium. Destaca-se que projetos como este vão além do uso de telescópios para fins de lazer e favorecem o ensino e a divulgação da ciência através da astronomia. Pereira (Pereira, 2002) propôs a criação de um observatório astronômico virtual no qual um telescópio robotizado comercial seria controlado por uma plataforma *Web* e o usuário teria acesso às imagens captadas pelo telescópio através desta plataforma. Em linha similar, Salazar, Orozco e Toro (Salazar, Orozco, Toro, 2014) descrevem o desenvolvimento de um observatório astronômico virtual na Colômbia, disponibilizado em um endereço eletrônico a partir do qual usuários têm acesso a um telescópio comercial Meade LX200GPS,

sem que seja necessário deslocar-se até o observatório. Um projeto semelhante desenvolvido no Brasil é o Astrofácil (Silva et al., 2006), que consiste em um manete ou *hand controller* bastante similar aos encontrados em montagens *GoTo* comerciais, contando com banco de dados para apontar para objetos celestes, display LCD para interface com o usuário e arquitetura com microcontroladores mestre e escravos, porém os autores mantiveram o foco na eletrônica e no firmware. Comparando o sistema de controle utilizado na montagem equatorial do presente trabalho com as opções disponíveis no mercado, ofereceu-se um sistema intermediário entre a motorização simples, capaz de rastrear alvos e fazer pequenas correções (movimentação apenas em velocidades baixas), e os sistemas *GoTo* completos, que não dependem de um computador para apontar o telescópio para alvos celestes.

As próximas seções deste artigo foram divididas de modo a garantir melhor entendimento ao leitor. O projeto do sistema mecânico é apresentado na seção 2, seguido pela definição do sistema eletroeletrônico na seção 3 e apresentação do firmware na seção 4. Testes e resultados são discutidos na seção 5, enquanto as conclusões são ponderadas na seção 6.

2 Sistema Mecânico

Considerando-se um dia solar médio de 24 horas, tempo gasto para uma revolução completa em torno do eixo polar, a velocidade de rotação do eixo AR para rastrear um alvo celeste é de apenas $4,166... \times 10^{-3}$ °/s (graus por segundo), velocidade muito baixa e que requer o uso de um sistema de redução. Há um número significativo de sistemas de redução disponíveis, sendo os dois tipos mais comumente encontrados em montagens equatoriais germânicas os sistemas de redução por engrenagens de dentes retos e os por coroa e parafuso sem-fim. Conjuntos coroa e sem-fim garantem movimentação mais suave e maiores taxas de redução com menor número de componentes, porém, apresentam baixo rendimento em consequência de o movimento ser transmitido primariamente por deslizamento e não por rolamento, aumentando as perdas por atrito (Budynas e Nisbett, 2015). Conjuntos coroa e sem-fim com elevadas taxas de redução também são autotravantes, o parafuso move a coroa, mas a coroa não é capaz de mover o parafuso, o que faz com que o telescópio permaneça travado em posição mesmo que não haja torque no parafuso sem-fim. Na transmissão da coroa para o parafuso sem-fim é comum encontrar montagens que empregam caixas de redução com engrenagens de dentes retos acionadas por motores de corrente contínua com *encoders* óticos para controle da velocidade e posição. Outra abordagem popular, especialmente entre os astrônomos amadores, consiste em utilizar um motor de passo para acionar o sem-fim através de uma correia sincronizadora, o que convenientemente adiciona um elemento flexível entre o motor e o sem-

fim e permite o controle de posição e velocidade em malha aberta.

Dado que as tarefas primárias de uma montagem equatorial são apontar para alvos celestes e rastreá-los, os eixos e o conjunto responsável por sua movimentação são os elementos principais, enquanto todos os demais componentes são estruturas suporte. A Figura 2 apresenta o conjunto mecânico da montagem equatorial projetada em modelo CAD, assim como o sistema de coordenadas absolutas utilizado para referenciar as posições dos eixos no *firmware*.

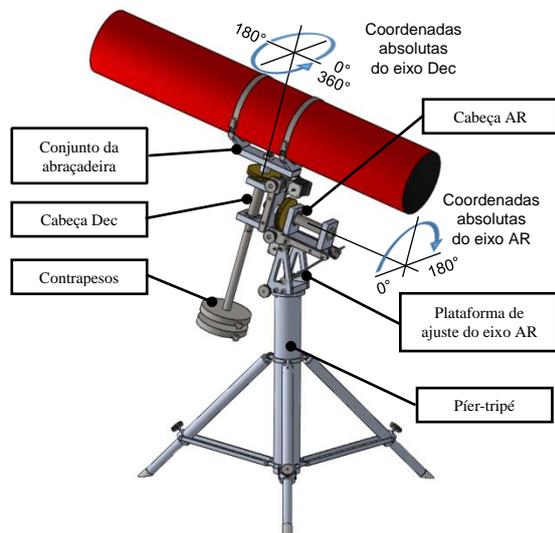


Figura 2. Modelo CAD da montagem equatorial projetada, o tubo vermelho representa um telescópio.

Na montagem deste projeto, optou-se por uma redução de 1:100 no conjunto coroa e sem-fim associada a uma transmissão por correias sincronizadoras do tipo HTD (*High Torque Drive*) 3M com redução de 12:50 e um motor de passo com resolução de 200 passos por revolução (ppr). O acionamento do motor de passo é feito por *drivers microstep* configurados para resolução de 1/16 passo por pulso, o que significa que a resolução do motor acionado pelo *driver microstep* é de 3200 ppr. Utilizando a Equação 1, na qual A representa a redução do conjunto coroa e parafuso sem-fim (1:100), B a redução na correia sincronizadora (12:50), e C a resolução do conjunto motor e *driver microstep* (3200 ppr), obtêm-se que a resolução do eixo R é de $2,7 \times 10^{-4}$ °/passo. Dividindo-se a velocidade de rotação do eixo ($4,166... \times 10^{-3}$ °/s) por R , obtêm-se que são necessários 15,432 passos por segundo para rastrear um alvo celeste a esta velocidade. Um observador utilizando uma ocular com campo de visão aparente de 50° , que combinada com seu telescópio resulte em uma ampliação de 250 vezes, terá um campo de visão real de $0,2^\circ$, este campo de visão é 740 vezes maior que os $0,00027^\circ$ que o eixo se move quando o motor dá um passo.

Existe aqui um compromisso entre resolução e velocidade, pois a montagem deve se mover a velocidades baixas durante o rastreamento, mas também precisa se mover a velocidades altas (em relação às velocidades de rastreamento) para mudar de alvo.

Para não modificar os *drivers*, limitou-se a velocidade máxima da montagem a $1,8^\circ/s$, o que corresponde a um intervalo de apenas 150 μs entre pulsos consecutivos enviados ao *driver*. Configurar o *driver* para 1/32 passo por pulso, por exemplo, resultaria em um rastreamento mais suave com 30,864 pulsos por segundo, mas implicaria em reduzir a velocidade máxima a $0,9^\circ/s$ devido a limitações de *hardware*.

$$R = \frac{360^\circ \times A \times B}{C} \quad (1)$$

Para fixação do telescópio, projetou-se um sistema de abraçadeiras que consistem em fitas de aço com fechos rápidos, capaz de acomodar telescópios com tubo ótico de diâmetros entre 200 e 285 mm, tamanhos usuais para telescópios newtonianos com espelhos primários de diâmetros entre 6 e 10 polegadas. A massa máxima do telescópio a ser montado varia de acordo com o número de contrapesos utilizados e o diâmetro do tubo ótico conforme apresentado na Tabela 1. A indicação da massa máxima do telescópio para um determinado número de contrapesos é aquela que pode ser equilibrada movendo-se os contrapesos para a posição mais distante do eixo AR, de forma que o torque neste eixo seja nulo (Lemes, 2018).

Tabela 1 — Massa máxima admissível para um telescópio na montagem de acordo com o N° de contrapesos (Lemes, 2018).

Diâmetro do tubo ótico (mm)	Massa Máxima do Telescópio (kg)				
	N° de contrapesos (2,7 kg por contrapeso)				
	1	2	3	4	5
200	4,2	8,4	-	-	-
230	3,9	7,9	11,6	-	-
250	3,8	7,6	11,2	14,6	-
285	3,5	7,0	10,4	13,6	16,6
300	3,4	6,8	10,1	13,2	16,1

Nota: valores de massa que estão abaixo do usual para o correspondente diâmetro de tubo ótico foram deixados na tabela com o intuito de mostrar a relação entre o diâmetro do tubo e a massa máxima permitida de acordo com a massa de contrapeso utilizada.

As cabeças AR e Dec, apresentadas na Figura 3, foram concebidas visando à padronização de componentes e diferem apenas nos suportes dos parafusos sem-fim, devido à necessidade de acoplar a cabeça AR à plataforma de ajuste. Todos os rolamentos selecionados são acessíveis no mercado e as posições relativas entre as coroas e os parafusos sem-fim foram escolhidas de forma que a força radial atuasse contra a força peso, reduzindo deflexões nos eixos. As coroas foram posicionadas próximas às cargas para aumentar a rigidez torcional e evitar vibrações de baixa frequência e alta amplitude nos eixos. Nos eixos dos parafusos sem-fim também há manípulos recartilhados que permitem movimentar os eixos sem o uso dos motores de passo (operação manual).

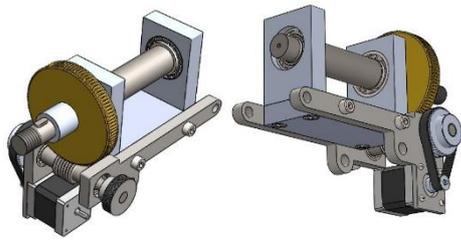


Figura 3. Vistas da cabeça Dec, à esquerda, e da cabeça AR, à direita (Lemes, 2018).

Para apontar o eixo AR na direção do polo celeste sul ou norte e fazer o alinhamento polar são necessários ajustes de azimute e altura do eixo, a estrutura que permite fazer tais ajustes é apresentada na Figura 4 e emprega um sistema simples, porém eficaz, que utiliza manípulos e uma barra roscada. A plataforma projetada permite ajustar o eixo para latitudes de 0° a 80°, bastando mudar a posição do manípulo na barra roscada para latitudes mais altas, nas quais a barra está submetida a esforço de compressão (situação na qual o comprimento sob esforço também é reduzido, prevenindo a flambagem da barra roscada). A plataforma de ajuste é diretamente encaixada no tripé da montagem, que é constituído essencialmente de tubos de alumínio e pode ser fechado para transporte e armazenagem. O tripé em formato de píer permite que o eixo AR seja ajustado para 0° (horizontal) sem que os contrapesos se choquem contra as pernas do tripé durante o uso da montagem equatorial, manípulos permitem ajustar as pernas telescópicas do tripé para que este se adapte a terrenos irregulares.

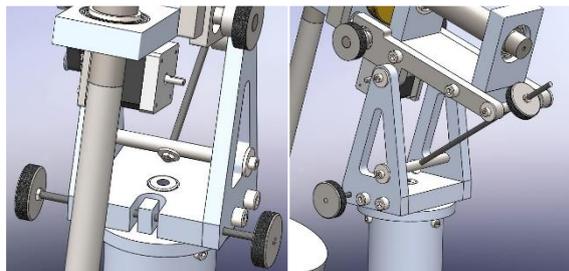


Figura 4. Plataforma de ajuste de azimute a altura do eixo AR (Lemes, 2018).

3 Sistema Eletroeletrônico

O sistema eletroeletrônico da montagem consiste em um Arduino Mega R3, onde são instalados um receptor infravermelho, cinco *leds* para sinalização, *drivers microstep*, motores de passo, uma fonte de alimentação, um controle remoto e, quando o usuário conecta a montagem ao *software* Stellarium para utilizar funções *GoTo*, um computador. A Figura 5 apresenta um diagrama explicativo do sistema, as linhas contínuas representam fluxo de sinais e informações, e as linhas tracejadas indicam sinais de potência elétrica. O Arduino, os *leds* e o receptor infravermelho foram acomodados em uma caixa transparente em acrílico, a fim de proteger estes componentes e dar maior robustez ao conjunto.

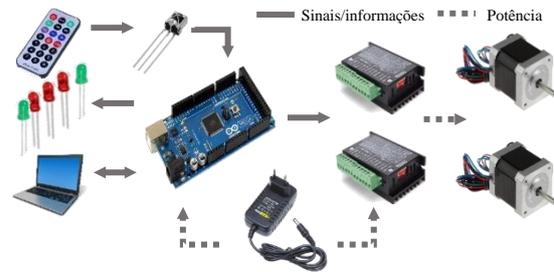


Figura 5. Diagrama mostrando a relação entre os componentes eletroeletrônicos da montagem (Lemes, 2018).

O controle remoto (Figura 6) permite ao usuário enviar comandos de acionamento à montagem equatorial, enquanto os *leds* sinalizam o estado da máquina e configurações selecionadas. Os sinais do controle remoto são captados pelo sensor infravermelho e processados no Arduino, que envia sinais aos *drivers microstep* para acionar os motores de passo (padrão NEMA 17 com torque nominal de 52 N·cm). Uma fonte chaveada de 12 V / 1,5 A fornece corrente contínua para alimentar o conjunto, exceto o computador. O Arduino Mega R3 utilizado no projeto opera com frequência de 16 MHz assim como o Arduino Uno R3. Ao compilar o *firmware* desenvolvido na IDE (*Integrated Development Environment*) Arduino, verifica-se as porcentagens de uso das memórias do microcontrolador: para a versão Mega, o *firmware* ocupa 11% da memória destinada a programas e as variáveis globais ocupam 12% da memória dinâmica; para a versão Uno estes valores sobem para 91% e 50%, respectivamente. No total são utilizadas apenas 12 portas da placa de desenvolvimento, o que permite o uso do Arduino Uno para controle da montagem (bastando reconfigurar os pinos), mas ressalta-se que o Mega R3 permite maiores modificações e melhorias futuras, devido à maior capacidade do *hardware*.

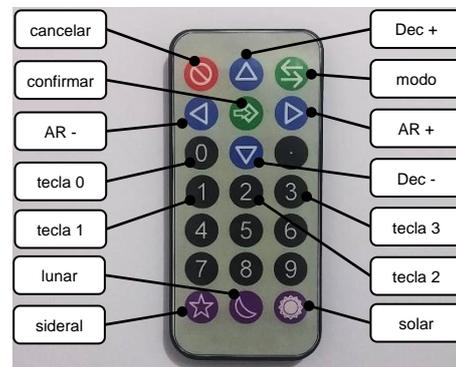


Figura 6. O controle remoto infravermelho da montagem e os nomes das teclas ativas. Foram utilizados símbolos de fácil associação para eliminar dependências com idioma.

4 Firmware

O *firmware* foi inteiramente escrito na própria IDE Arduino e utiliza apenas as bibliotecas *stdlib.h*, *math.h*, *IRremote.h* e *EEPROM.h*. Todas as demais funções, como controle dos motores de passo, atri-

buição de funções às teclas do controle remoto, e envio e recebimento de coordenadas na comunicação com o Stellarium foram implementadas no próprio código para maximizar a compatibilidade e evitar a dependência de bibliotecas não padrão.

Para determinar a orientação da montagem (se o telescópio está apontado para Leste ou Oeste, por exemplo) e as posições reais dos eixos o firmware utiliza um sistema de coordenadas referenciado na própria montagem, denominado “sistema absoluto”, ilustrado na Figura 2, e a configuração do hemisfério de referência (Norte ou Sul) que é fornecida pelo usuário e salva na memória não volátil do Arduino. Sempre que a montagem é inicializada (alimentação ligada) é necessário mover a montagem para a posição de referência ilustrada na Figura 2 e confirmar para definir as coordenadas absolutas, isto se deve ao sistema de controle em malha aberta, entretanto a instalação de e *encoders* absolutos ou de potenciômetros lineares de uma volta nos eixos eliminaria esta limitação do sistema. As coordenadas relativas (ascensão reta e declinação), são definidas sincronizando a montagem com o Stellarium. Para isto basta apontar o telescópio para uma estrela visível, selecionar a mesma estrela no Stellarium e enviar um comando de viragem *GoTo* para a montagem equatorial, que atribui as coordenadas recebidas do Stellarium à sua posição atual. É possível operar a montagem equatorial sem sincronizá-la com o Stellarium caso se deseje utilizá-la sem o computador.

O diagrama da Figura 7 ilustra os modos de operação da montagem equatorial: o Modo 1 é destinado à configuração inicial da montagem para definição das coordenadas absolutas e relativas; o Modo 2 destina-se à operação com a montagem conectada ao Stellarium; e o Modo 3 é destinado à operação da montagem sem o auxílio do computador. O procedimento executando pela montagem equatorial no Modo 2 para apontar o telescópio para um novo alvo ao receber um comando *GoTo* do Stellarium é ilustrado na Figura 8.

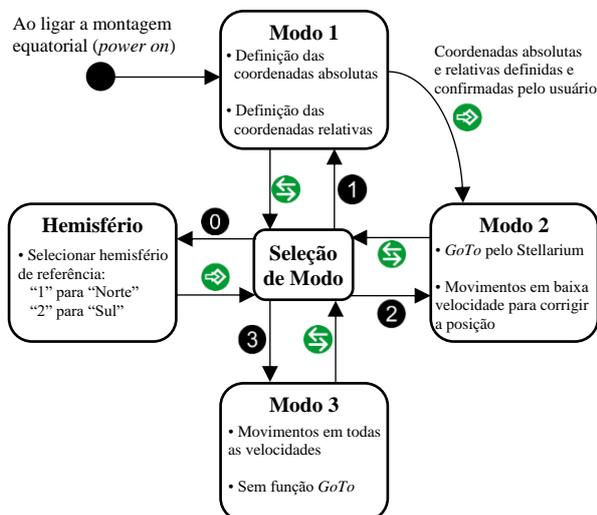


Figura 7. Modos de operação da montagem equatorial. Os símbolos representam as teclas do controle remoto a serem pressionadas para alternar entre os modos.

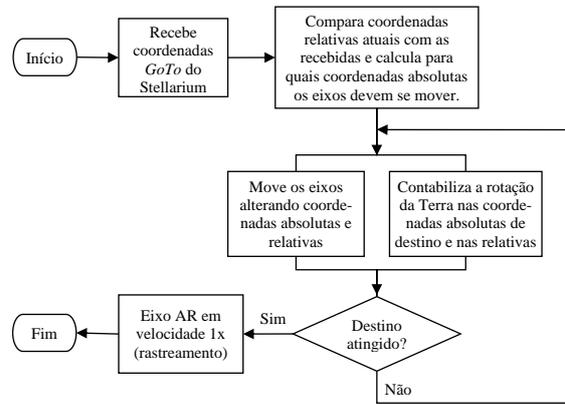


Figura 8. Procedimento seguido para apontar o telescópio para um novo alvo ao receber coordenadas *GoTo* do Stellarium..

As velocidades dos motores são controladas comparando-se os intervalos de tempo entre os pulsos enviados aos *drivers*, e na configuração padrão dos divisores de *clock* do Arduino Mega R3 o tempo reportado pela a função *micros()* é medido em intervalos de 4 μ s. Três velocidades de rastreamento podem ser selecionadas: a velocidade sideral, utilizada para rastrear astros fora do sistema solar; a velocidade lunar, utilizada para mover o eixo AR de forma a rastrear a Lua; e a velocidade solar, utilizada para rastrear o Sol e planetas. A duração média de um dia sideral é de 86164,0989041 s (Aoki et al., 1982); a duração de um solar médio é 86400 s (Clemence, 1948); e a partir do período orbital sideral da Lua, que é de 27,321662 dias solares médios (Chalub, 2009), chega-se que a Lua gasta 89682,4675 s para cruzar o mesmo meridiano. Com a Equação 2, na qual R é dado pela Eq. (1) e T_{ref} refere-se aos intervalos de tempo 86164,0989041 s, 86400 s e 89682,4675 s, calcula-se os intervalos entre pulsos correspondentes às velocidades sideral, solar e lunar, respectivamente. Manipulando-se as equações, obtêm-se 64623 μ s para a velocidade sideral, 64800 μ s para a solar, e 67262 μ s para a lunar. Estes valores são parâmetros de referência e podem ser ajustados no *firmware*, efeitos de refração atmosférica e erros de alinhamento polar não foram considerados.

$$P = \frac{R \times T_{ref}}{360^\circ} \quad (2)$$

No total são disponibilizadas 9 velocidades que o usuário incrementa ou decrementa gradativamente pressionando as teclas do controle sucessivas vezes: 0x (motor parado), 1x, 2x, 4x, 8x, 0,225°/s, 0,45°/s, 0,9°/s e 1,8°/s; as velocidades com “x” são múltiplas da velocidade de referência que estiver sendo usada. No modo 2, é permitido ao usuário incrementar somente até a velocidade de 0,225°/s, pois parte-se do pressuposto de que movimentações feitas manualmente neste modo são para pequenos ajustes. Neste modo a velocidade de 1,8°/s só é atingida quando a montagem executa um posicionamento *GoTo*, a transição entre as velocidades mínima (0,0084°/s ou $\approx 2x$) e máxima (1,8°/s ou $\approx 430x$) é feita de forma automática e obedece à Equação 3 (Lemes, 2018).

$$V(t) = (V_{max} - V_{min}) \left[0,5 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi t}{10} + \frac{3\pi}{2} \right) + 0,5 \right] + V_{min} \quad (3)$$

A Figura 9 ilustra a curva de transição entre as velocidades mínima e máxima (definida pela Equação 3) para o caso de a velocidade incrementar no tempo; a mesma curva é seguida para decrementar a velocidade, porém no sentido oposto. A curva real de velocidade, no entanto, não é contínua, pois as velocidades são alteradas discretamente em intervalos de 100 ms seguindo intervalos entre pulsos armazenados em um vetor que é calculado na inicialização.

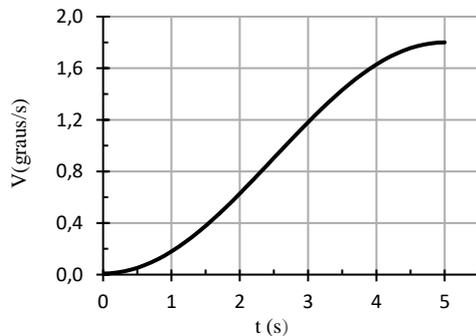


Figura 9. Curva de transição de velocidade para posicionamento automático, o intervalo de transição é 5s (Lemes, 2018).

A comunicação entre a montagem e o Stellarium é feita em ASCII e obedece ao protocolo de comunicação MEADE LX200 (Meade, 2010), do qual apenas seis comandos essenciais são utilizados. Devido aos *drivers microstep* serem configurados para 3200 pulsos por revolução (o ajuste é feito por chaves nos *drivers*), foi necessário programar o *firmware* para pausar a comunicação serial sempre que o intervalo entre os passos de algum dos motores é inferior a 1 ms. A parte da comunicação que é pausada se refere aos pedidos de coordenadas relativas atuais que o Stellarium envia via serial, que são respondidas pelo Arduino com as coordenadas de ascensão reta e declinação. Como o último dado recebido fica armazenado no *buffer* do Arduino e o Stellarium não envia novos dados até que os anteriores tenham sido respondidos, a comunicação é reestabelecida sem problemas assim que a operação de posicionamento automático é terminada ou que a velocidade dos motores esteja suficientemente baixa. A comunicação sem pausa com os motores em velocidade alta provoca oscilações indesejadas na velocidade, o que acontece porque o Arduino leva pouco menos de 1 ms para calcular as coordenadas relativas e enviá-las ao Stellarium. Uma opção para evitar esta pausa na comunicação seria controlar o fator de divisão dos *drivers* com o Arduino, porém isto exigiria que o entusiasta interessado em construir a montagem modificasse os *drivers* e por este motivo optou-se por manter a pausa na comunicação serial.

Algoritmos das principais partes do *firmware* assim como um *link* para acesso ao mesmo podem ser consultados em Lemes (Lemes, 2018).

5 Testes e Resultados

O desempenho geral da montagem foi avaliado qualitativamente por meio de testes com estrelas, planetas e com a Lua, a fim de testar as velocidades de rastreamento, a movimentação dos eixos, a capacidade de centrar um alvo na ocular ao fazer pequenos ajustes e a capacidade fazer grandes movimentações para mudar de alvo e chegar a posição final com o mesmo dentro do campo de visão da ocular. A Figura 10 é uma fotografia da montagem equatorial em ambiente externo durante testes, enquanto a Figura 11 apresenta o Arduino integrado à cabeça AR e conectado aos *drivers* e motores.



Figura 10. A montagem equatorial do projeto com um telescópio newtoniano rastreamento estrela próxima ao meridiano durante procedimento de alinhamento polar por declinação (Lemes, 2018).

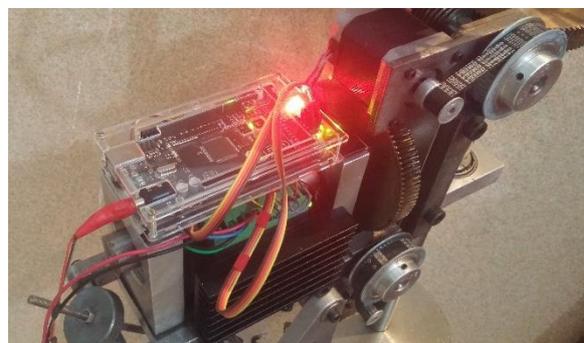


Figura 11. Detalhe da cabeça AR com os componentes eletroeletrônicos acoplados.

A operação manual da montagem equatorial utilizando os manípulos, isto é, sem uso de motores, é suave e permite corrigir a posição do objeto no campo de visão de forma simples e rápida durante observações visuais, mesmo com magnificações com magnificação de 165x e campo de visão de 0,3 °. Usando o controle remoto para controlar a montagem em operação no Modo 3 consegue-se maior suavidade, uma vez que são os motores os responsáveis pela movimentação e não as mãos do usuário. Não obstante, tem-se a impressão de que a movimentação manu-

al utilizando os manípulos é mais natural e rápida. A montagem equatorial também se mostrou silenciosa, mesmo quando os motores estão em velocidade máxima (1,8 °/s).

Testes no modo 2 foram executados com a montagem equatorial controlada pelo Stellarium para avaliar o desempenho do posicionamento automático. No geral, o desempenho é melhor quando se faz um bom alinhamento polar, o que pode ser conseguido através de um alinhamento polar por declinação. Se o telescópio estiver apontado para uma estrela A, com a mesma centrada no campo de visão e sincronizada com o Stellarium, e o usuário utilizar o um comando *GoTo* para apontar o telescópio para uma estrela B que esteja próxima à estrela A (a cerca de 30° de distância, por exemplo), ao final da movimentação a estrela B fica levemente deslocada do centro do campo de visão. As maiores variações acontecem quando se aponta o telescópio para um alvo no lado oposto do meridiano, situação em que o alvo pode ficar na borda do campo de visão (teste feito com uma ocular cuja ampliação resultava em um campo de visão real de 1,23°). As fontes destes erros podem ser variadas e requerem uma investigação mais detalhada, mas tais erros podem estar relacionados à refração atmosférica, erros de posição dos motores que são controlados em malha aberta, folgas no sistema mecânico, ou qualquer combinação destes fatores. Contudo, o sistema de posicionamento automático se mostrou de grande ajuda e permite localizar alvos celestes com praticidade e rapidez, bastando que o usuário faça pequenos ajustes utilizando o controle remoto para centrar o objeto no campo de visão.

Observações com a montagem em modo de rastreamento inicialmente revelaram escorregamentos dos astros (isto é, a movimentação do astro dentro do campo de visão quando este deveria permanecer parado), porém após ajuste experimental dos intervalos de tempo entre os pulsos enviados aos *drivers microstep* tais efeitos foram reduzidos a ponto de não incomodarem. Para a velocidade sideral, o intervalo entre pulsos que apresentou melhor desempenho geral foi 65084 μs; para a velocidade lunar o melhor intervalo encontrado foi 67268 μs, e para a velocidade solar 64784 μs. Segundo King (King, 1902), a velocidade de um instrumento necessária para acompanhar o movimento aparente diurno das estrelas não é exatamente a velocidade sideral e nem mesmo é constante, mas menor que a velocidade sideral e variando conforme a posição do astro, devido aos efeitos da refração atmosférica. O intervalo entre pulsos de 65084 μs para velocidade sideral e os demais intervalos, no entanto, fornecem velocidades que apresentaram melhor desempenho para uso geral, necessitando apenas de pequenos ajustes de posição por parte do usuário após períodos de tempo relativamente longos: são necessários cerca de 10 minutos para que uma estrela se mova de forma apreciável no campo de visão (teste com magnificação de 165x e campo de visão real de 0,30°).

O desempenho da velocidade solar foi verificado rastreando-se o planeta Saturno e também são neces-

sários cerca de 10 minutos para se notar movimentos no campo de visão. A Figura 12 é uma fotografia de Saturno feita a partir do empilhamento de quadros de 2 minutos de vídeo, gravado em resolução 640x480 pontos com uma câmera *webcam* de 1,3 Megapixel. A montagem equatorial mantém o objeto observado estabilizado no campo de visão, enquanto o controle remoto permite ao usuário corrigir de forma rápida e prática a posição do astro sem que seja necessário tocar na montagem, evitando vibrações que degradariam a qualidade da imagem.



Figura 12. Foto de Saturno feita com uma *webcam* e o conjunto de equipamentos apresentado na Figura 10 (Lemes, 2018).

A Figura 13 é uma fotografia da Lua feita pela técnica afocal, na qual posiciona-se uma câmera após a ocular (isto é, na saída da ocular). Nenhum tipo de filtro foi utilizado para reduzir o brilho do satélite, o que poderia ajudar a realçar mais detalhes de sua superfície. Ao ajustar a montagem equatorial para a velocidade de rastreamento lunar a Lua é mantida no campo de visão, permitindo que o usuário a observe sem se preocupar em acompanhar o movimento aparente diurno como aconteceria ao utilizar uma montagem não motorizada. Rastrear a Lua de forma ótima envolveria também a movimentação do eixo Dec, mas como o satélite possui brilho muito forte, não há necessidade de utilizar longa exposição para capturar sua imagem. Além disso, verificou-se em testes que as correções nas coordenadas Dec são pequenas: percebe-se algum escorregamento em declinação somente após cerca de dez minutos de rastreamento (teste feito com magnificação de 54x e campo de visão real de 1,23°).



Figura 13. Foto da Lua feita com um celular posicionado após a ocular. A magnificação é de 36x (Lemes, 2018).

A astrofotografia de longa exposição pode envolver tempos de exposição de 30 a 60 minutos se forem utilizadas montagens com sistemas de guia-gem (uma câmera auxiliar que monitora a posição do astro e informa à montagem quando incrementar ou decrementar a velocidade), porém há técnicas menos exigentes que envolvem o empilhamento de múltiplas fotografias com tempos de exposição menores, desde 15 segundos a 2 minutos ou mais, variando conforme a técnica e a preferência do astrônomo amador. Não foi possível testar o desempenho da montagem equatorial para astrofotografias de longa exposição devido à indisponibilidade de equipamentos para fazê-lo (câmeras DSLR ou sensores CCD apropriados), mas com base nos resultados obtidos nos testes feitos até então espera-se que seja possível utilizar a montagem equatorial germânica do projeto para este tipo de astrofotografia, desde que não se utilizem tempos de exposição muito longos.

6 Conclusão

O projeto desta montagem equatorial germânica foi guiado pela simplicidade e oferece aos entusiastas da astronomia amadora uma montagem equatorial robusta e funcional. Aqueles que desejarem uma montagem manual podem optar por construir somente a parte mecânica, aqueles que desejarem a versão com *GoTo* podem executar o projeto completo, e até mesmo os entusiastas que já tiverem uma montagem equatorial não motorizada podem se beneficiar deste projeto que fornece o sistema eletroeletrônico e o firmware, o que dá liberdade para adaptações, modificações e melhorias. Os testes realizados com a montagem permitiram verificar o funcionamento da mesma, que é capaz de acomodar telescópios de dimensões similares aos utilizados por entusiastas da astronomia amadora e permite rastrear astros em velocidade sideral, lunar e solar. Quando conectada a um computador, o usuário pode utilizar o planetário de código aberto Stellarium para enviar coordenadas de objetos celestes à montagem para que esta aponte o telescópio para objetos de forma automática, facilitando assim a operação do equipamento. Este projeto também retrata, de forma pragmática, como sistemas mecânicos, elétricos e computacionais se integram para compor uma máquina, evidenciando sua natureza multidisciplinar.

O sistema atual pode ser aprimorado através do controle dos fatores de divisão dos *drivers microstep* com o Arduino e da adição de *encoders* para controle em malha fechada de posição e velocidade dos eixos. Um display LCD associado a um módulo de relógio e a um sistema de armazenamento de dados permitiria a implementação de um banco de dados próprio para cálculo das posições dos astros, eliminando a necessidade do computador para usar funções *GoTo*, porém aumentaria a complexidade e o custo do sistema. Tal abordagem também permitiria compensar, via *firmware*, erros de posição causados pela refração atmosférica e por erros de alinhamento polar.

Agradecimentos

Os autores agradecem à EMC/UFG e à PRAE/UFG pelo incentivo e apoio à divulgação do trabalho.

Referências Bibliográficas

- Aoki, S., Guinot, B., Kaplan, G., Kinoshita, H., McCarthy, D., Seidelmann, P (1982). The New Definition of Universal Time. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 105, No. 2, pp. 359-361.
- Assafin, M (2004). *Astronomia Fundamental e Astrometria*. Observatório do Valongo – UFRJ, Rio de Janeiro - RJ.
- Bely, P (2003). *The Design and Construction of Large Optical Telescopes*. Springer, New York - NY.
- Budynas, R. and Nisbett, J (2015). *Shingley's Mechanical Engineering Design*, 9th ed. McGraw-Hill, New York - NY.
- Canalle, J. e Matsuura, O (2007). *Astronomia: Curso de Astronáutica e Ciências do Espaço*. Agência Espacial Brasileira, Brasília - DF.
- Chalub, F (2009). The Saros cycle: obtaining eclipse periodicity from Newton's laws. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol. 31, No. 1, pp.1303.1-1303.6. Disponível em < <http://ref.scielo.org/rkr45p>>. Acesso em: 30 mar. 2018.
- Clemence, G (1948). On the System of Astronomical Constants. *The Astronomical Journal*, Vol. 53, No. 6, pp.169-179.
- King, E (1902). Forms of Image in Stellar Photography. *Annals of the Astronomical Observatory of Harvard College*, Vol. 41, No. 6, pp. 153-187.
- Lemes, C (2018). *Projeto, Execução e Teste de uma Montagem Equatorial Germânica Computadorizada para Telescópios*. Monografia. Universidade Federal de Goiás.
- Meade (2010). *Meade Telescope Serial Command Protocol*. Disponível em <https://www.meade.com/support/TelescopeProtocol_2010-10.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2018.
- Pereira, A (2002). *Observatórios Astronômicos Virtuais e o Ensino de Ciências*. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Salazar, E., Orozco, J., Toro, D (2014). Design and Construction of an Astronomical Online Observatory. *IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ColComCon.2014.6860411
- Silva, M., Pereira, M., Salvador, C., Cancian, R., Torres, R., Zeferino, C (2006). *AstroFácil: Sistema Computacional Embarcado para Automatização de Telescópios de Pequeno Porte*. In: Grahl, E. A. & Hübner, J. F., eds. *Anais do XV SEMINCO*. Blumenau: Universidade Regional de Blumenau, pp. 165-176. Disponível em <<http://www.inf.furb.br/seminco/2006/>>. Acesso em: 30 mar. 2018.