Aquário Inteligente: Simulador de Dispositivo IoT em Assembly MIPS

Ana Beatriz R. Garcia (168.480)[1] **Bruno de A. Correia ()**[2]
Leonardo A. Araújo (168.873)[3]

[1] Instituto de Ciência e Tecnologia – Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP)
CEP 12247-014 – São José dos Campos – SP – Brasil

ana.garcia29@unifesp.br, bcorreia@unifesp.br,
arazo.leonardo@unifesp.br

Link para repositório github: `https://github.com/Arazoleo/Aqu-rio-Inteligente`

Resumo. *Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador de dispositivo embarcado IoT (Internet of Things) em Assembly MIPS, implementando um sistema de monitoramento e controle de aquário inteligente. O projeto utiliza o simulador SPIM e implementa funcionalidades como leitura de sensores (temperatura, pH, oxigênio dissolvido e luminosidade), controle automático de atuadores (aquecedor, aerador e iluminação), histórico de leituras com buffer circular, cálculo de média móvel com detecção de tendência, e índice de qualidade da água. O sistema demonstra conceitos fundamentais de arquitetura de computadores, incluindo uso de pilha para gerenciamento de chamadas de função, manipulação de vetores, operações de ponto flutuante, e implementação de algoritmos clássicos em baixo nível.*

1. Introdução

O desenvolvimento de sistemas embarcados e dispositivos IoT representa uma área de crescente importância na computação atual. A compreensão de como esses sistemas funcionam em nível de hardware e software de baixo nível se torna fundamental para profissionais da área de computação. Este projeto apresenta a implementação de um simulador de aquário inteligente em Assembly MIPS, demonstrando como conceitos de arquitetura de computadores podem ser aplicados em cenários práticos de automação.

O aquário inteligente é um exemplo representativo de sistema IoT, pois integra múltiplos sensores para monitoramento ambiental, atuadores para controle automático, e lógica de processamento para tomada de decisões baseada em regras. O tema permite explorar diversos aspectos da programação em baixo nível, incluindo manipulação de dados numéricos (inteiros e ponto flutuante), estruturas de dados (vetores), controle de fluxo, e modularização através de funções.

O projeto foi desenvolvido utilizando o simulador SPIM, que implementa a arquitetura MIPS32, permitindo a execução e depuração de código Assembly em ambiente controlado. A implementação demonstra o uso adequado de convenções de chamada de função, gerenciamento de pilha, e utilização do coprocessador de ponto flutuante para operações com números decimais.

2. Arquitetura do Sistema

2.1. Visão Geral

O sistema Aquário Inteligente é organizado em módulos que simulam os componentes de um dispositivo IoT real:

- **Módulo de Sensores:** Simula a leitura de quatro tipos de sensores: temperatura (°C), pH, oxigênio dissolvido (mg/L) e luminosidade (%).
- **Módulo de Atuadores:** Controla três dispositivos: aquecedor, aerador e sistema de iluminação, com estados ON/OFF baseados em regras automáticas.
- **Módulo de Histórico:** Implementa um buffer circular para armazenamento das últimas 10 leituras de temperatura.
- **Módulo de Análise:** Calcula média móvel, detecta tendências (subindo/descendo/estável) e computa índice de qualidade da água.
- **Interface de Usuário:** Menu interativo ASCII com opções de operação manual, automática e visualização de dados.

2.2. Estrutura de Dados

O programa utiliza a seção `.data` para armazenar variáveis e estruturas de dados:

Variáveis de Sensores:

- `temp_atual`: Valor float da temperatura atual
- `ph_atual`: Valor float do pH atual
- `o2_atual`: Valor float do oxigênio dissolvido
- `luz_atual`: Valor inteiro (word) da luminosidade

Buffer Circular:

```
historico_temp: .space 40    # 10 floats x 4 bytes
indice_hist:    .word 0      # indice atual (0-9)
total_leituras: .word 0      # contador total
```

2.3. Tecnologias Utilizadas

Simulador: SPIM (MIPS32 Simulator) versão 9.1.24, executado via linha de comando em ambiente macOS.

Arquitetura: MIPS32 com coprocessador de ponto flutuante (FPU - Coprocessor 1).

Syscalls Utilizadas:

- Syscall 1: Impressão de inteiro
- Syscall 2: Impressão de float
- Syscall 4: Impressão de string
- Syscall 5: Leitura de inteiro
- Syscall 6: Leitura de float
- Syscall 10: Encerramento do programa

3. Funcionalidades Implementadas

3.1. Menu Principal

O sistema apresenta um menu interativo com seis opções:

1. **Ler sensores manualmente:** Permite entrada de valores pelo usuário
2. **Modo automático:** Executa N leituras simuladas (1-10)
3. **Ver histórico de temperatura:** Exibe últimas leituras e média móvel
4. **Ver índice de qualidade:** Calcula e exibe pontuação 0-100
5. **Situação atual:** Exporta relatório completo do sistema
6. **Sair:** Encerra o programa

3.2. Leitura de Sensores

A função `ler_sensores` solicita entrada do usuário para cada sensor:

```
ler_sensores:
    addi $sp, $sp, -4       # prologo: reserva pilha
    sw $ra, 0($sp)          # salva endereco de retorno

    li $v0, 6               # syscall 6 = ler float
    syscall
    s.s $f0, temp_atual     # salva temperatura

    ...

    jal adicionar_ao_historico  # salva no buffer

    lw $ra, 0($sp)          # epilogo: restaura $ra
    addi $sp, $sp, 4
    jr $ra                  # retorna
```

3.3. Exibição de Interface

A função `exibir_interface` mostra o painel de status com valores e classificação:

```
========================================
TEMP: 26.0 C [OK]
pH:   7.0 [OK]
O2:   6.5 mg/L [OK]
LUZ:  50% [OK]
========================================
```

A classificação é determinada comparando cada valor com seus limites usando instruções de ponto flutuante:

```
l.s $f0, temp_atual     # carrega temperatura
l.s $f2, temp_min       # carrega limite minimo
c.lt.s $f0, $f2         # compara: temp < min?
bc1t exibir_temp_critico # se verdadeiro, CRITICO
```

3.4. Controle de Atuadores

O sistema implementa regras automáticas para controle dos dispositivos:

Sensor	Condição	Atuador	Ação
Temperatura	$< 24℃$	Aquecedor	Liga
Temperatura	$\geq 24℃$	Aquecedor	Desliga
Oxigênio	$< 5.0\,mg/L$	Aerador	Liga
Oxigênio	$\geq 5.0\,mg/L$	Aerador	Desliga
Luminosidade	$< 30\%$	Iluminação	Liga
Luminosidade	$\geq 30\%$	Iluminação	Desliga

Tabela 1. Regras de controle automático dos atuadores

3.5. Verificação de Alertas

A função `verificar_alertas` exibe mensagens de aviso quando valores estão fora dos limites aceitáveis:

- Temperatura baixa: risco de peixes lentos
- Temperatura alta: risco de estresse térmico
- pH ácido ou alcalino: risco de vida para peixes
- Oxigênio crítico: risco de asfixia
- Luminosidade inadequada: risco para vegetação ou proliferação de algas

3.6. Histórico com Buffer Circular

O histórico de temperatura utiliza um vetor de 10 posições implementado como buffer circular:

```
adicionar_ao_historico:
    la $t0, historico_temp  # endereco base
    lw $t1, indice_hist     # indice atual (0-9)

    sll $t2, $t1, 2         # offset = indice * 4
    add $t0, $t0, $t2       # endereco = base + offset

    l.s $f0, temp_atual
    s.s $f0, 0($t0)         # armazena no vetor

    addi $t1, $t1, 1        # incrementa indice
    li $t3, 10
    blt $t1, $t3, salvar    # se < 10, salva
    li $t1, 0               # senao, volta para 0
salvar:
    sw $t1, indice_hist
```

A instrução `sll $t2, $t1, 2` (Shift Left Logical) multiplica o índice por 4, pois cada float ocupa 4 bytes.

3.7. Cálculo de Média Móvel

A função `calcular_media_movel` implementa o algoritmo de média aritmética das últimas N leituras:

```
calcular_media_movel:
    mtc1 $zero, $f4          # acumulador = 0.0

soma_loop:
    bge $t1, $t5, dividir    # se i >= n, divide

    sll $t2, $t1, 2
    add $t3, $t0, $t2
    l.s $f6, 0($t3)          # carrega valor[i]
    add.s $f4, $f4, $f6      # soma += valor[i]

    addi $t1, $t1, 1
    j soma_loop

dividir:
    mtc1 $t5, $f8            # n como inteiro
    cvt.s.w $f8, $f8         # converte para float
    div.s $f4, $f4, $f8      # media = soma / n
```

3.8. Detecção de Tendência

Após calcular a média móvel, o sistema detecta a tendência comparando o valor atual com a média:

- **SUBINDO:** temperatura atual $> \mathit{média} + 0.5°C$
- **DESCENDO:** temperatura atual $< \mathit{média} - 0.5°C$
- **ESTÁVEL:** diferença dentro de $\pm 0.5°C$

3.9. Índice de Qualidade da Água

O índice de qualidade varia de 0 a 100 pontos, com 25 pontos atribuídos para cada parâmetro dentro do range ideal:

Parâmetro OK	Pontos
Temperatura (24–28°C)	+25
pH (6.5–8.0)	+25
Oxigênio ($\geq 5.0\, mg/L$)	+25
Luminosidade (30–70%)	+25
Total Máximo	**100**

Tabela 2. Sistema de pontuação do índice de qualidade

A classificação final é:

- 100 pontos: ÓTIMO
- 75-99 pontos: BOM
- 50-74 pontos: REGULAR
- 0-49 pontos: RUIM

3.10. Modo Automático

O modo automático simula leituras sequenciais com valores que variam gradualmente:

- Temperatura: oscila entre 22°C e 30°C (variação de ±0.5°C por iteração)
- pH: varia junto com a temperatura
- Oxigênio: varia inversamente
- Luminosidade: incrementa de 5% em 5%, reiniciando em 30% ao passar de 80%

4. Requisitos Técnicos Atendidos

4.1. Mínimo de 3 Funções

O projeto implementa 10 funções além da main:

1. `ler_sensores`: Leitura de valores dos sensores
2. `exibir_interface`: Exibição do painel de status
3. `verificar_alertas`: Verificação e exibição de alertas
4. `controlar_atuadores`: Controle automático de dispositivos
5. `adicionar_ao_historico`: Armazenamento no buffer circular
6. `exibir_historico`: Exibição do histórico de temperaturas
7. `calcular_media_movel`: Cálculo da média das leituras
8. `calcular_qualidade`: Cálculo do índice de qualidade
9. `exibir_qualidade`: Exibição da pontuação e classificação
10. `exportar_log`: Exportação de relatório completo

4.2. Uso de Pilha

Todas as funções utilizam a pilha para preservar o endereço de retorno ($ra):

```
funcao:
    addi $sp, $sp, -4   # reserva 4 bytes na pilha
    sw $ra, 0($sp)      # salva $ra

    ... corpo da funcao ...

    lw $ra, 0($sp)      # restaura $ra
    addi $sp, $sp, 4    # libera pilha
    jr $ra              # retorna
```

A função `calcular_qualidade` também preserva o registrador $s0:

```
calcular_qualidade:
    addi $sp, $sp, -8   # reserva 8 bytes
    sw $ra, 4($sp)      # salva $ra em sp+4
    sw $s0, 0($sp)      # salva $s0 em sp+0

    li $s0, 0           # usa $s0 como acumulador

    ... calcula pontuacao ...

    lw $s0, 0($sp)      # restaura $s0
    lw $ra, 4($sp)      # restaura $ra
    addi $sp, $sp, 8    # libera pilha
    jr $ra
```

4.3. Uso de Vetor

O histórico de temperatura utiliza um vetor de 10 elementos:

```
historico_temp: .space 40   # 10 floats x 4 bytes
```

O acesso ao vetor é feito através de cálculo de endereço:

```
la $t0, historico_temp  # endereco base
sll $t2, $t1, 2         # offset = indice * 4
add $t0, $t0, $t2       # endereco = base + offset
l.s $f0, 0($t0)         # carrega elemento
```

4.4. Algoritmo Não Trivial

O projeto implementa dois algoritmos não triviais:

Média Móvel: Soma de N valores com divisão para cálculo da média, utilizando conversão entre tipos inteiro e ponto flutuante.

Buffer Circular: Estrutura de dados que reutiliza posições do vetor quando atinge o limite máximo, permitindo armazenamento eficiente das últimas N leituras.

4.5. Interface ASCII

O sistema apresenta interface baseada em texto com:

- Menu principal com opções numeradas
- Painéis formatados com bordas
- Status visual [OK], [ATENÇÃO], [CRÍTICO]
- Mensagens de alerta descritivas
- Relatório de situação completo

5. Uso de IA Generativa

5.1. Abordagem Adotada

Durante o desenvolvimento deste projeto, **não foram utilizados trechos de código gerados diretamente por IA generativa**. Todo o código Assembly MIPS foi escrito manualmente, garantindo total compreensão de cada instrução implementada.

A única aplicação de IA generativa foi de natureza **conceitual e educacional**, especificamente para esclarecer dúvidas sobre operações com valores de ponto flutuante, que eram desconhecidas antes do projeto.

5.2. Orientações Conceituais Obtidas

A IA foi consultada para explicar os seguintes conceitos relacionados ao coprocessador de ponto flutuante (FPU) do MIPS:

- **Registradores $f0-$f31:** Entendimento de que o MIPS possui um conjunto separado de registradores para operações com números decimais, acessados através do coprocessador 1.

- **Sufixo .s nas instruções:** Compreensão de que o sufixo `.s` indica operações com precisão simples (*single precision*, 32 bits), diferenciando de `.d` para precisão dupla.
- **Instrução mtc1:** Esclarecimento sobre a necessidade de usar `mtc1` (Move To Coprocessor 1) para transferir valores entre registradores inteiros e de ponto flutuante.
- **Conversão de tipos:** Explicação sobre o uso de `cvt.s.w` para converter valores inteiros (word) para float, necessário para operações como divisão na média móvel.
- **Comparações de float:** Orientação sobre o uso de `c.lt.s` para comparação seguido de `bc1t`/`bc1f` para desvio condicional, diferente do padrão usado com inteiros.
- **Syscalls 2 e 6:** Informação sobre as syscalls específicas para impressão e leitura de valores float, que utilizam $f12 e $f0 respectivamente.

5.3. Justificativa

A consulta conceitual foi necessária pois o material didático da disciplina focava principalmente em operações com inteiros. As operações de ponto flutuante, embora documentadas no manual do MIPS, possuem sintaxe e comportamento distintos que não eram familiares ao desenvolvedor.

Após compreender os conceitos, todo o código foi implementado manualmente, aplicando o conhecimento adquirido às necessidades específicas do projeto (leitura de sensores, cálculo de média móvel, comparações de limites, etc.).

5.4. Não Houve Correções de Código Gerado por IA

Como não foram utilizados trechos de código gerados por IA, não houve necessidade de correções relacionadas a erros típicos de geração automática (instruções inválidas, registradores inexistentes, sintaxe incorreta, etc.). Todos os erros encontrados durante o desenvolvimento foram erros de digitação ou lógica do próprio desenvolvedor, corrigidos durante o processo normal de depuração.

6. Registradores Utilizados

Registrador	Uso no Projeto
$ra	Endereço de retorno de funções
$sp	Ponteiro da pilha
$t0-$t6	Valores temporários, índices, contadores
$s0, $s1	Valores preservados entre chamadas (contadores do modo auto)
$a0	Argumento para syscalls (string ou inteiro)
$v0	Código da syscall / valor de retorno
$f0-$f26	Operações de ponto flutuante
$f12	Argumento para impressão de float (syscall 2)

Tabela 3. Registradores utilizados no projeto

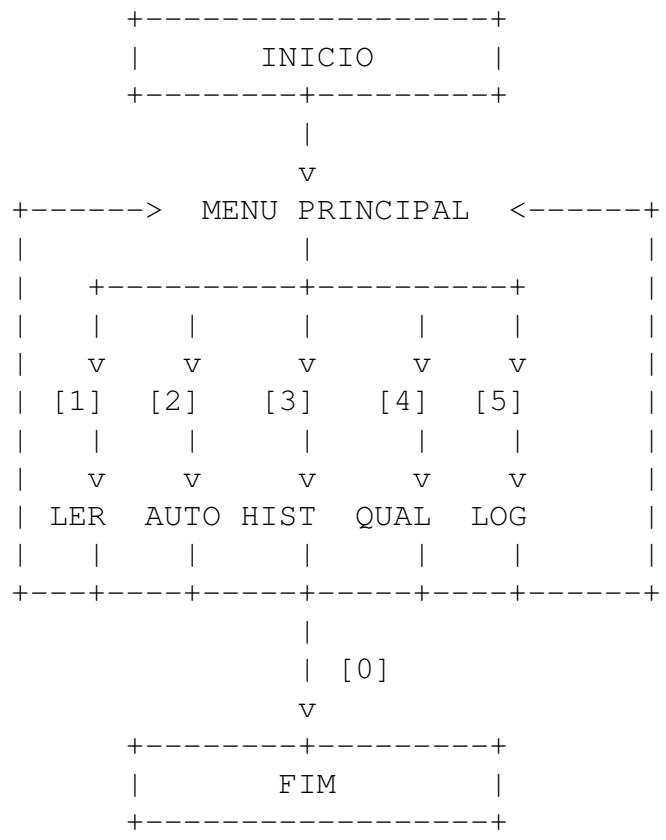
7. Instruções de Ponto Flutuante Utilizadas

Instrução	Descrição
`l.s $f0, var`	Carrega float da memória
`s.s $f0, var`	Armazena float na memória
`li.s $f0, 1.5`	Carrega constante float
`add.s $f0, $f2, $f4`	Soma de floats
`sub.s $f0, $f2, $f4`	Subtração de floats
`div.s $f0, $f2, $f4`	Divisão de floats
`neg.s $f0, $f2`	Negação (inverte sinal)
`c.lt.s $f0, $f2`	Compara se menor
`bc1t label`	Branch se comparação verdadeira
`bc1f label`	Branch se comparação falsa
`mtc1 $t0, $f0`	Move inteiro para float (bits)
`cvt.s.w $f0, $f0`	Converte word para single

Tabela 4. Instruções de ponto flutuante utilizadas

8. Diagrama de Estados

O sistema opera como uma máquina de estados com o menu principal como estado central:



9. Resultados e Testes

O programa foi testado com diversas combinações de entrada:

Teste 1 - Valores Normais:

- Entrada: Temp=26°C, pH=7.0, O2=6.5mg/L, Luz=50%
- Resultado: Todos [OK], Qualidade 100/100, ÓTIMO

Teste 2 - Valores Críticos:

- Entrada: Temp=20°C, pH=5.0, O2=3.0mg/L, Luz=10%
- Resultado: Todos [CRÍTICO], alertas exibidos, atuadores ligados

Teste 3 - Modo Automático:

- Entrada: 10 leituras automáticas
- Resultado: Valores oscilando corretamente, histórico preenchido, média móvel calculada

10. Conclusão

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um simulador de aquário inteligente em Assembly MIPS, demonstrando a aplicação prática de conceitos de arquitetura de computadores em um contexto de sistemas embarcados IoT.

A IA generativa serviu como ferramenta para compreensão de conceitos não estudados até então de forma rápida. Sendo assim, o uso com parcimônia de recursos vindos de LLM (*Large Language Models*) pode se tornar um fator positivo, ajudando no aprendizado e na praticidade.

Trabalhos futuros podem incluir: implementação de validação de entrada, adição de mais sensores e atuadores, simulação de tempo real com delays, e integração com arquivo para persistência de dados (syscalls 13-15).

Referências

[1] PATTERSON, D. A.; HENNESSY, J. L. *Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface*. 5th ed. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2017.

[2] LARUS, J. R. *SPIM: A MIPS32 Simulator*. Disponível em: `https://spimsimulator.sourceforge.net/`. Acesso em: 2024.

[3] VOLLMAR, K.; SANDERSON, P. *MARS: MIPS Assembler and Runtime Simulator*. Disponível em: `https://courses.missouristate.edu/KenVollmar/MARS/`. Acesso em: 2024.

[4] SWEETMAN, D. *See MIPS Run*. 2nd ed. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2007.