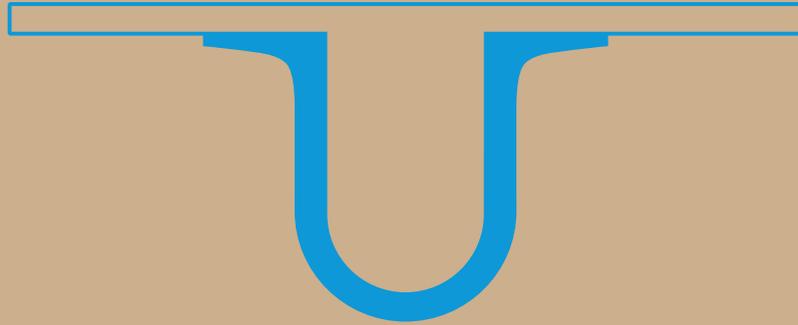


FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA



Manuel Dias Cardoso

GESTÃO AUTOMÁTICA DE ENSAIOS TRIAXIAIS
EM ESTUDOS DE GEOTECNIA

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Física, Ramo
Instrumentação, orientada pelo Professor Doutor Francisco José de
Almeida Cardoso do Departamento de Física e apresentada ao
Departamento de Física.

Setembro de 2018

Gestão Automática de Ensaios Triaxiais em Estudos de Geotecnia

Manuel Dias Cardoso

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Física, Ramo Instrumentação, orientada pelo Professor Doutor Francisco José de Almeida Cardoso do Departamento de Física e apresentada ao Departamento de Física.

Setembro de 2018



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA



Resumo

O objetivo da presente dissertação é a concepção e o desenvolvimento de um sistema de ensaios triaxiais de solos, baseado nas premissas de simplicidade de instalação, utilização e manutenção.

Transversal a todas as áreas de conhecimento em instrumentação, um sistema de ensaios permite conjugar as tecnologias em estado de arte de transdutores inteligentes, microcontroladores e informática com os algoritmos mais avançados de aquisição, processamento e visualização de dados no objetivo comum de automatizar o ensaio triaxial de solos, permitir a telegestão e obtenção de resultados de elevada qualidade científica e técnica em Geotecnia.

Palavras Chave: Ensaio Triaxiais de Solos, Instrumentação, Automatização, Transdutores Inteligentes, Telegestão.

Abstract

The objective of this dissertation is the design and development of a system of triaxial soil tests, based on the premises of simplicity of installation, use and maintenance.

Transversal to all areas of knowledge in instrumentation, a test system allows to combine the state-of-the-art technologies of intelligent transducers, microcontrollers and computing with the most advanced algorithms of data acquisition, processing and visualization in the common goal of automating the triaxial test of soils, to allow remote management and to obtain results of high scientific and technical quality in Geotechnics.

Keywords: Triaxial Soil Testing, Intelligent Transducers, Instrumentation, Automation, Remote Management.

Dedicatória

Com amor e carinho para a minha esposa Andreia e meu filho Gustavo.

Eternamente grato pela vossa paciência e espírito de sacrifício que permitiram a conclusão com sucesso desta etapa nas nossas vidas.

Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas que diretamente ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste projeto com destaque especial para:

Professor Doutor Francisco Cardoso

Professor Doutor António Correia

Engenheiro Luís Oliveira

Emanuel Rocha

João Marques

Conteúdo

1	Introdução	1
2	O Ensaio Triaxial do ponto de vista da Instrumentação	3
3	A Conceção do Sistema de Ensaios Triaxiais de Solos	11
3.1	Arquitetura geral do sistema.....	11
3.2	O bloco Material	13
3.3	O bloco lógico.....	16
3.4	A rede digital de Informação.....	18
4	Desenvolvimento do bloco material	19
4.1	A interface Analógica/Digital	20
4.2	Controlador de volume e pressão.....	28
4.3	O controlador do sistema.....	31
5	Desenvolvimento do bloco lógico.....	37
5.1	Interface gráfica de utilizador	37
6	Demonstração experimental	45
6.1	Enchimento da câmara de ensaios	45
1.1	Esvaziamento da câmara de ensaio.....	48
1.2	Correlação entre Pressão de carga e Força de carga.....	50
7	Síntese e conclusão	55
8	Referências Bibliográficas	57
9	Anexos	59
9.1	Esquema eletrónico da Interface Analógica/Digital.....	59
9.2	Esquema eletrónico da Interface de Isolamento	75

Índice de Figuras

Figura 1: Tensões sobre um elemento de solo no seu meio natural.....	3
Figura 2: Câmara de Ensaio Triaxial existente no LG	5
Figura 3: Embarrilamento da amostra e correção da área.	5
Figura 4: Hipótese de tensões a atuarem sobre a amostra durante um ensaio.	6
Figura 5: Corte transversal de uma amostra drenada	7
Figura 6: Logotipo do Sistema de Ensaios Triaxiais de Solos.....	11
Figura 7: Arquitetura geral uCTRIAX	11
Figura 8: Esquema funcional do SETAS.....	13
Figura 9: Arquitetura do bloco material	14
Figura 10: Organização do BL em grupos funcionais sincronizados.	17
Figura 11: Diagrama de Tubagens e Instrumentação (P&ID) do BM.....	19
Figura 12: PAA33X. Cortesia da KELLER AG	20
Figura 13: Gráfico da Pressão atmosférica obtida pelo PAA33X.....	21
Figura 14: Previsão do comportamento do ADC24 em função do ganho.	24
Figura 15: Esquema de blocos da IAD.....	27
Figura 17: Imagem do protótipo IAD.	27
Figura 17: Imagem exterior da IAD.	27
Figura 18: Esquema de componentes da CVP	28
Figura 19: Imagem final do protótipo do CVP.	30
Figura 20: Diagrama de blocos do Controlador do Sistema (CS).....	31
Figura 21: Painel de conetores do CS.	32

Figura 22: Estrutura do software embebido.	34
Figura 23: Instantâneo da IGU uCTRIAX.	37
Figura 24: Registo de eventos do sistema.	39
Figura 25: Diálogo de configuração da área de gráficos.	39
Figura 26: Diálogo de configuração das séries.	40
Figura 27: Diálogo de criação de um projeto.	41
Figura 28: Diálogo de edição de uma fase.	42
Figura 29: Diálogo de importação de um projeto existente.	43
Figura 30: Circuito de enchimento da câmara de ensaios.	45
Figura 31: Gráfico da evolução de P_{Cell} durante o processo de enchimento da câmara.	46
Figura 32: Circuito de esvaziamento da câmara de ensaios.	48
Figura 33: Evolução de P_{Cell} durante o processo de esvaziamento da câmara.	49
Figura 34: Montagem experimental de correlação entre F_{Load} e P_{Load}	51
Figura 35: Correlação entre a F_{load} e P_{load} , durante a compressão da mola.	52
Figura 36: Correlação entre a F_{load} e P_{load} , durante a descompressão da mola.	52

1 Introdução

O presente trabalho tem como objeto o desenvolvimento de um sistema de ensaios triaxiais de solos (SETAS), projeto do Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (DEC/UC).

Os utilizadores finais deste sistema são os investigadores em mecânica dos solos e alunos de mestrado ou doutoramento pelo que existe a responsabilidade acrescida da aquisição de dados de elevada qualidade.

Note-se que um sistema de ensaios completo é um projeto transversal a todas as áreas de conhecimento em Instrumentação, nomeadamente a física aplicável ao ensaio, transdutores, sistemas embebidos e distribuídos, redes informáticas, programação de software e telegestão. Neste caso em particular também existe a necessidade de desenvolvimento de componentes mecânicos e hidráulicos.

A simplicidade de instalação, utilização e manutenção são premissas que estarão presentes em todo o processo de conceção e desenvolvimento.

Inicialmente os objetivos apontavam no sentido da integração de componentes comerciais e no desenvolvimento das aplicações de software necessárias para o desempenho das tarefas de programação de ensaios, monitorização e análise de dados.

A proposta inicial e o respetivo orçamento, levaram a uma revisão dos objetivos pelo facto de o montante em questão ser incomportável nas condições económicas atuais.

A revisão dos objetivos levou à separação do projeto em duas fases:

1ª fase – desenvolvimento de componentes para demonstração de conceitos a nível de transdutores inteligentes, sensores e atuadores. As peças de software mantêm-se por serem centrais neste projeto.

2ª fase – revisão do projeto com incorporação do conteúdo de facto demonstrado na 1ª fase, fabrico de componentes em falta e colocação em funcionamento do SETAS.

No contexto de dissertação de Mestrado em Instrumentação, definiu-se como objeto de trabalho a primeira fase, isto é, conceção, desenvolvimento e demonstração do funcionamento dos sensores, atuadores, controlador do sistema e interface de utilizador.

No capítulo 2 apresenta-se uma breve descrição do processo de análise triaxial de solos, identificando as grandezas a medir e a controlar durante um ensaio, bem como o aparato laboratorial necessário à reprodução em laboratório das condições naturais de ocorrência das amostras de solo. Com base na interpretação das grandezas físicas a medir e controlar e das condicionantes materiais do ensaio ir-se-á determinar, ou pelo menos propor, os processos de medida e controlo mais adequados.

No capítulo 3 apresenta-se o processo de conceção do sistema identificando-o como um sistema constituído por dois blocos, bloco material (ciberfísico) e bloco lógico (aplicação de gestão remota).

O capítulo 4 apresenta a memória descritiva e justificativa do desenvolvimento dos componentes de sujeição mecânica das amostras de solo.

O capítulo 5 apresenta a memória descritiva e justificativa do desenvolvimento da aplicação de gestão remota, em particular a interface de utilizador que é a face visível. Neste ponto será introduzido o conceito de programação de ensaios por *script*, dividido em etapas, simples de programar e depurar, mas possibilitando o controlo completo de todos os elementos do sistema como convém a um investigador.

No capítulo 6 encontram-se descritas as experiências para demonstração de conceitos bem como a apresentação de resultados. A demonstração da correlação entre variáveis poderá permitir o desenvolvimento de processos de aquisição que possam ir de encontro às premissas de simplicidade anteriormente apresentadas. Pretende-se também demonstrar o funcionamento do sistema nas fases inicial e final de um ensaio.

No capítulo 7 será apresentada uma síntese da conceção e desenvolvimento deste projeto, dos objetivos atingidos, das dificuldades encontradas e sugestões para trabalhos futuros.

2 O Ensaio Triaxial do ponto de vista da Instrumentação

O objetivo da realização de testes triaxiais é determinar as propriedades mecânicas do solo. Assume-se que as amostras de solo a serem testadas são homogêneas e representativas do material no campo e que as propriedades desejadas podem, de facto, ser obtidas a partir dos testes triaxiais.

Os ensaios triaxiais permitem determinar relações de tensão-deformação, resistência ao corte e mudança de volume ou comportamento da pressão dos poros no solo.

Outras propriedades que podem ser obtidas a partir dos ensaios triaxiais, que incluem o tempo como componente, são a permeabilidade, o coeficiente de consolidação e as taxas de relaxamento de tensão. Para uma referência completa consultar (Lade, 2016).

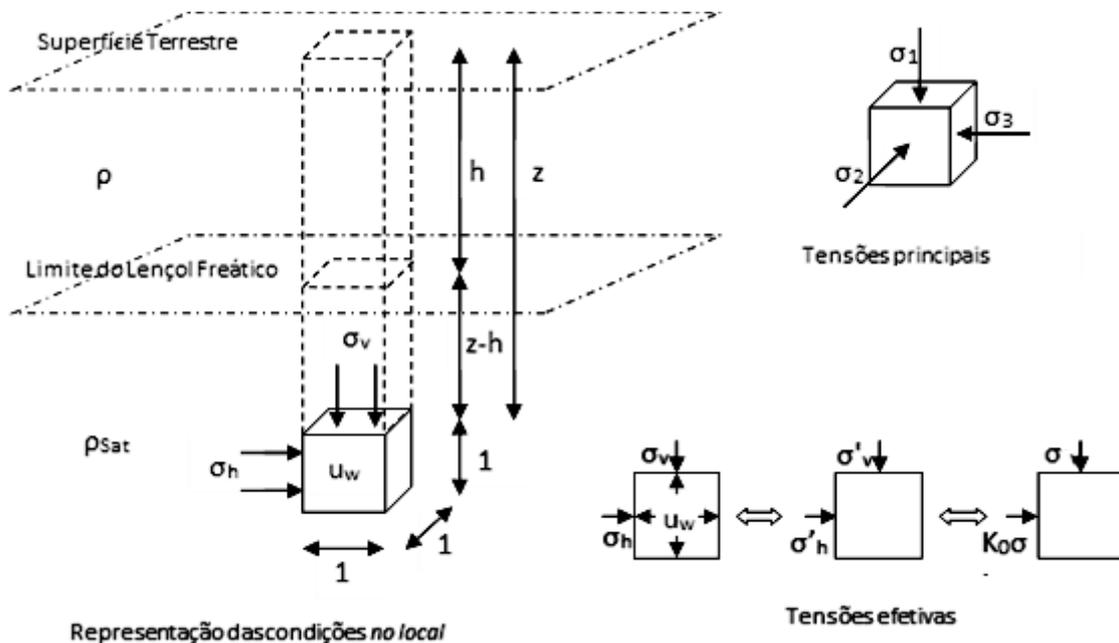


Figura 1: Tensões sobre um elemento de solo no seu meio natural.

Na Figura 1 encontram-se esquematizadas as tensões a que um elemento de solo está sujeito no seu meio de ocorrência natural, designadas por condições de campo. Um elemento de solo, cubico unitário, abaixo do nível do lençol freático, é constituído por um **esqueleto de solo**, grãos sólidos do elemento de solo, em que as tensões são transmitidas apenas nos pontos de contacto (tensão efetiva). A pressão dos poros (u_w) é a pressão hidrostática exercida pela coluna de água na vertical do elemento.

Sendo:

- ρ : Densidade volumétrica do solo (kg/m^3).
- ρ_{sat} : Densidade volumétrica do solo saturado (kg/m^3).
- ρ_w : Densidade volumétrica da água (1000kg/m^3).
- g : Aceleração gravítica do local ($9,8196 \text{ ms}^{-2}$ ao nível do mar).
- K_0 : Coeficiente de pressão do solo em repouso ou coeficiente de impulso em repouso.

As grandezas assinaladas na Figura 1 são:

- $\sigma_v = [h\rho g + (z-h)\rho_{\text{sat}}g + F_{\text{VExt}}]/A$: Tensão exercida pelo peso da coluna de solo assente sobre a superfície superior do elemento, A , podendo também incluir forças externas como por exemplo as forças induzidas por construções civis naquela vertical.
- $u_w = (z-h)\rho_w g$: Pressão dos poros, pressão exercida pela coluna de água do lençol freático na vertical do elemento.
- $\sigma'_v = \sigma_v - u_w$: Tensão efetiva aplicada na superfície superior do elemento. Parte de σ_v é compensada pela pressão hidrostática da água.
- $\sigma'_h = K_0\sigma'_v$: A tensão efetiva horizontal é proporcional à tensão efetiva vertical. A constante de proporcionalidade é K_0 .
- $\sigma_h = \sigma'_h + u_w = K_0\sigma'_v + u_w$: Tensão horizontal sobre o elemento de solo.

O elemento central de um sistema de ensaios triaxiais é a câmara pressurizada. A amostra de solo deve ser condicionada de modo a representar as tensões aplicadas no elemento do solo. Naturalmente a preparação da amostra encontra-se fora do âmbito deste trabalho. Considera-se para todos os efeitos que a amostra é de facto representativa do solo em análise.

Na Figura 2 está representada a constituição da câmara de ensaios triaxiais, já existente no Laboratório de Geotecnia, com identificação dos elementos que executam as funções de aquisição e controlo das grandezas físicas relevantes.

A amostra de geometria cilíndrica de eixo vertical, com diâmetro e altura iniciais respetivamente $D_0 = 38\text{mm}$ e $H_0 = 76\text{mm}$, é confinada pela pressão hidrostática que se identifica como sendo P_{Cell} .

A pressão neutra é medida nos dois extremos da amostra sendo definida como P_{WUp} no topo e P_{WDw} na base.

A força medida pela célula de carga e definida como F_{Load} está relacionada com a tensão vertical sobre a amostra pela relação $\sigma_v = F_{Load}/A$, sendo A a área da secção transversal da amostra cuja determinação implica algumas simplificações e recurso a um modelo matemático.

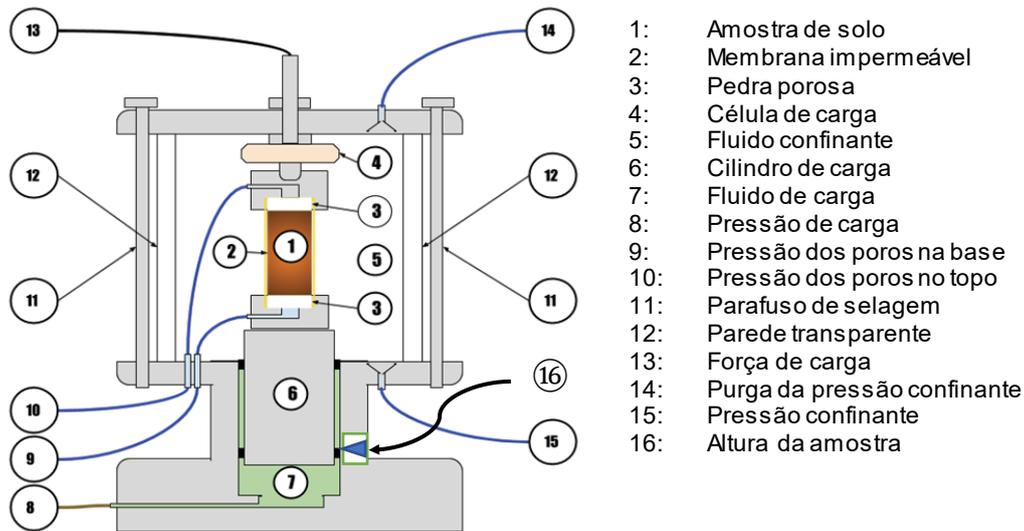


Figura 2: Câmara de Ensaio Triaxial existente no LG

O efeito de embarilamento da amostra cilíndrica implica a correção da área, sendo esta definida como a área da secção transversal de um cilindro regular de igual volume e altura (Figura 3).

Este modelo fornece um meio de determinação da tensão vertical, contudo algumas dúvidas se levantam em relação à razão pela qual é definida a área desta forma.

Observando-se o facto de a amostra estar contida entre dois suportes rígidos, no topo e na base, que fixam as áreas respetivas enquanto que a restante superfície da amostra fica sujeita à pressão hidrostática do fluido confinante, P_{Cell} , e da pressão dos poros, P_w , indica que a geometria da amostra não é arbitrária, mas sim a adequada para as condições particulares.

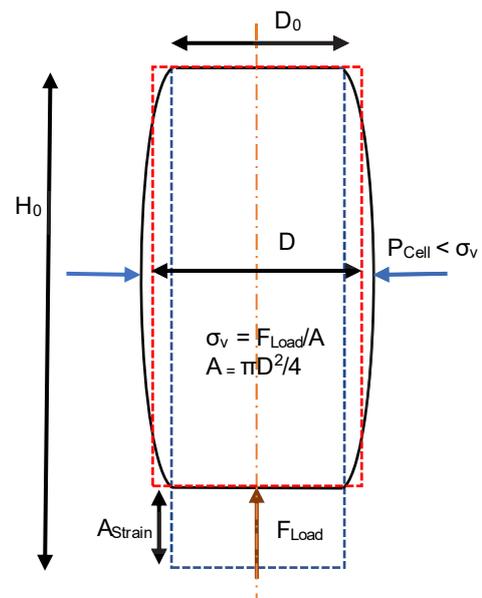


Figura 3: Embarilamento da amostra e correção da área.

Neste momento apresenta-se uma hipótese que vai para além do âmbito deste trabalho e, portanto, não se pretende aqui demonstrar a sua validade, mas sim extrair algum conhecimento que possa ser útil no desenvolvimento do sistema instrumental de suporte ao ensaio.

Um corpo imerso num fluido fica sujeito a uma pressão hidrostática (Figura 4). A pressão hidrostática manifesta-se por uma força perpendicular a cada elemento da superfície do corpo de tal modo que a tensão superficial total $\sigma_s = P_{Cell} A_s$, sendo A_s a superfície exposta a P_{Cell} . Supondo que não existe variação de volume, o que pode ser conseguido numa amostra

saturada sem drenagem, o sistema tenderá a configurar-se de modo que a tensão superficial total seja mínima, isto é a superfície seja mínima para o volume em questão. Do cálculo variacional sabe-se que a superfície que minimiza a superfície de um dado volume entre dois círculos fixos é a catenoide.

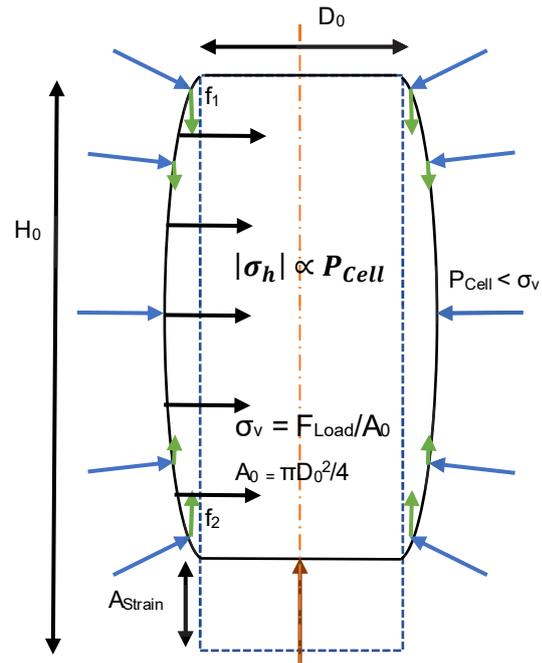


Figura 4: Hipótese de tensões a atuarem sobre a amostra durante um ensaio.

$$\sigma_{Smin} \rightarrow A_{Smin} \xrightarrow{\text{Areas do topo e da base fixas}} \text{Catenoide}$$

A catenoide é uma superfície de revolução em torno de um eixo cuja geratriz é uma catenária. Tal como a catenária também a catenoide apresenta propriedades interessantes.

A primeira das propriedades é ser constante a tensão, força por unidade de área, na direção do eixo do sólido de revolução, qualquer que seja a área da secção reta.

Pode-se escolher a área fixa da base como área de referência, tal que:

$$\sigma_v = F_{Load} / A_0 \text{ com } A_0 = \pi D_0^2 / 4$$

Este resultado está claramente em desacordo com o modelo anteriormente apresentado, no qual recorde-se havia a necessidade de correção da área.

Não se pretende aqui demonstrar qualquer teoria dentro desta hipótese, servindo apenas para entendimento do que realmente acontece com a amostra durante o ensaio, dentro do que for fisicamente lógico.

Uma outra propriedade da catenoide é a tensão perpendicular ao eixo de revolução, σ_h , ser constante por unidade de altura da amostra. No caso de a amostra estar saturada a pressão dos poros segue a pressão confinante e, portanto, a tensão horizontal é distribuída uniformemente pela pressão dos poros o que equivale a dizer que as três tensões são iguais.

Se a amostra for drenada, isto é a pressão dos poros deixar de seguir a pressão confinante, a tensão horizontal será transmitida maioritariamente pelo esqueleto do solo e intensifica-se com a diminuição da distância ao eixo.

Como a amostra é cilíndrica verifica-se que a força exercida pela pressão confinante sobre um elemento da superfície da amostra vai atuar numa área cada vez menor conforme se aproxima do eixo. Diminuindo a área implica que a tensão vai aumentar com a aproximação ao eixo. Na Figura 5 pode verificar-se que o perímetro vai diminuir ao aproximar-se do centro. Esta diminuição é a responsável pela diminuição de área, implicando uma concentração das forças e, portanto, a tensão horizontal apresenta o perfil ilustrado na Figura 5.

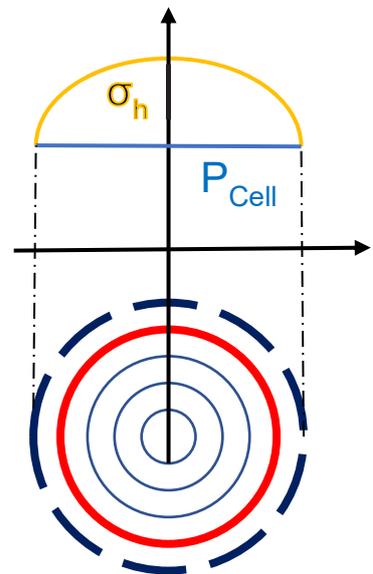


Figura 5: Corte transversal de uma amostra drenada

Reitera-se o facto de ser apenas uma hipótese fora do âmbito deste trabalho, não se pretendendo aqui confirmar ou invalidar qualquer resultado, sendo que qualquer referência posterior às grandezas em questão serão feitas no contexto do modelo apresentado anteriormente e comumente praticado pela comunidade de geotecnia.

A determinação da deformação volumétrica da amostra, V_{Strain} , será feita mediante recurso à variação total do volume de fluido na câmara de ensaio, ΔV_{Cell} , ao qual se irá subtrair a porção de veio de carga que entrou dentro da câmara, ΔV_{Load} . A apresentação do resultado pode ser feita em valor absoluto, $V_{Strain} = \Delta V_{Cell} - \Delta V_{Load}$, ou como fração do volume inicial da amostra, $\frac{V_{Strain}}{V_0} = -C_s \Delta \sigma'_v$, valor que se relaciona com a variação da tensão vertical efetiva através da constante de compressibilidade do esqueleto do solo,

C_s . O sinal negativo da expressão reflete o facto de a deformação volumétrica (axial ou radial) ser positiva por convenção sempre que leve a uma diminuição das dimensões da amostra.

A partir da altura da amostra e do seu volume pode-se determinar o seu raio e a deformação radial da mesma, R_{Strain} . De forma idêntica à deformação volumétrica a deformação radial e a deformação axial podem ser apresentadas na forma absoluta ou relativa respetivamente ao raio e à altura inicial.

A força de carga, F_{Load} , medida pela célula de carga permite determinar a tensão vertical mediante o modelo apresentado.

Observe-se que a célula de carga se encontra imersa num fluido pressurizado, muito provavelmente água, sendo necessária uma construção especial para suportar as pressões a que será sujeita e naturalmente resistente à corrosão. Um sensor com estes requisitos é naturalmente de custo elevado e com uma alta probabilidade de sofrer avarias. Um outro inconveniente da célula de carga ser interna é a necessidade de ter um meio de conduzir o respetivo cabo elétrico para o exterior o que complica de facto a estrutura mecânica da câmara de ensaios. Acresce o facto de estar solidário com a parte superior da camara que tem de ser removida para instalação da amostra propiciando choques mecânicos no sensor ou eventual guilhotinamento do cabo.

A célula de carga manter-se-á na posição que ocupa atualmente, no entanto irá ser previsto um processo alternativo de medida da tensão vertical através da pressão do fluido de carga. Por uma questão Física, a pressão de carga, P_{Load} , está correlacionada com a força de carga, contudo, o desconhecimento do comportamento do mecanismo de carga existente na base da câmara, mecanismo que de facto se desconhece a natureza por não existir documentação técnica do mesmo nem ter sido possível a sua desmontagem para identificação, exige que a correlação ou a falta dela seja demonstrado experimentalmente.

Se se vier a confirmar a correlação entre pressão de carga e força de carga pode-se simplificar a construção do sistema de ensaios com ganhos de simplicidade na instalação, utilização e manutenção, premissas originais neste projeto.

O processo de determinação da altura da amostra irá ter um desenvolvimento análogo ao da célula de carga. O sensor de deslocamento é externo, mas de localização muito sensível, estando sujeita a sofrer choques mecânicos que podem danificá-lo ou corromper a sua calibração.

A determinação da variação do volume de carga ou de forma equivalente a variação da altura da amostra pode ser feita pelo sensor de deslocamento ou por um processo que use outra grandeza correlacionada e que apresente vantagens. No desenvolvimento do controlador de volume e pressão (**CVP**) será aprofundada a problemática da determinação da altura da amostra.

3 A Conceção do Sistema de Ensaios Triaxiais de Solos

Neste capítulo será apresentado o processo de conceção do Sistema de Ensaios Triaxiais de Solos, SETAS, numa perspetiva do todo para as partes.

Um sistema de ensaios triaxiais de solos, destinado a equipar o Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, fruto de uma colaboração interdepartamental foi concebido sob a designação **uCTRIAX**. O logotipo encontra-se na Figura 6.



Figura 6: Logotipo do Sistema de Ensaios Triaxiais de Solos

No início era apenas um nome, um recipiente vazio, sem forma nem conteúdo, mas, ainda assim com uma identidade. Identidade essa que será moldada em cada uma das fases seguintes, acrescentando conteúdo e capacidades.

3.1 Arquitetura geral do sistema

A arquitetura geral do sistema é de algum modo a evolução natural do sistema em funcionamento no laboratório, visto este ser basicamente um sistema distribuído (Coulouris & Kindberg, 2011) composto por dois blocos, designadamente o bloco material (BM) e o bloco lógico (BL). Na figura 7 encontra-se esquematizada a arquitetura geral do uCTRIAX.

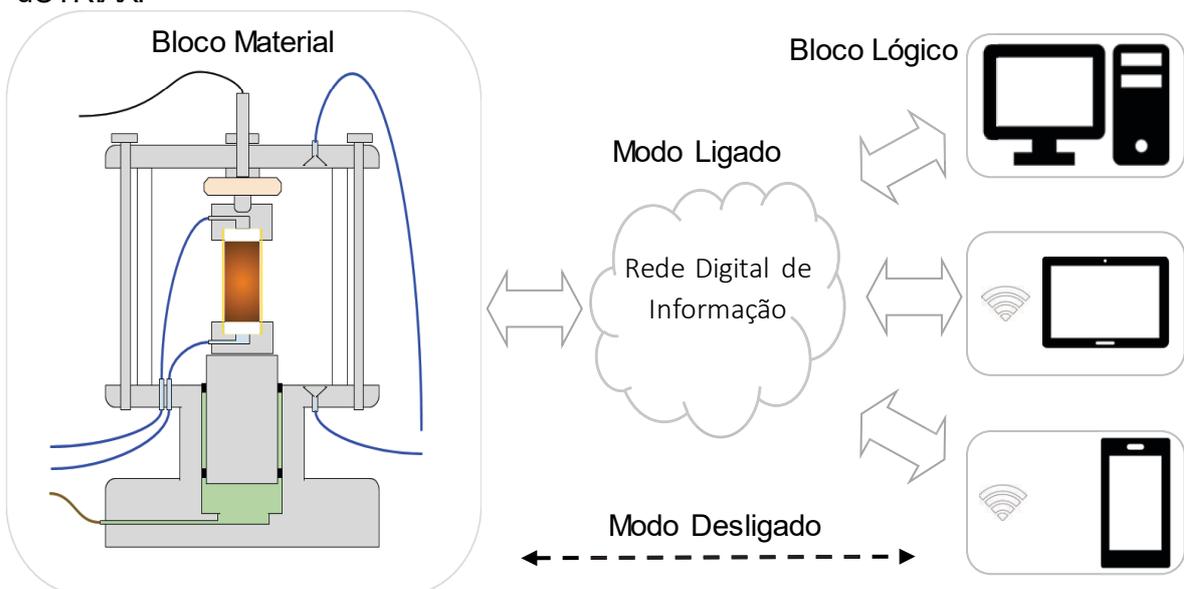


Figura 7: Arquitetura geral uCTRIAX

O BM aqui representado pela camara de ensaios inclui todo o aparato material necessário á execução de ensaios.

O BL, peça intangível de software, pode materializar-se num qualquer dispositivo computadorizado. Os dois blocos encontram-se ligados por meio de uma rede digital de informações, doravante designada por **RDI**.

Como já referido, mantém na sua essência a arquitetura geral do sistema em funcionamento. O que muda neste projeto são as tecnologias utilizadas para ir de encontro às premissas globais de facilidade de instalação, utilização e manutenção do sistema.

A adoção de serviços da Internet na interligação dos dois blocos permite dotar o bloco lógico de mobilidade o bastante para simplificar a operação do sistema de ensaios fora do espaço do laboratório. A condição necessária é um dispositivo computadorizado com acesso à internet.

O facto de ser um sistema distribuído implica a existência de processamento em paralelo e funções complementares, isto é, os blocos em si são funcionalmente independentes, o que leva a uma conceção do mesmo no sentido da não obrigatoriedade de manutenção da ligação entre os dois blocos no caso de não comprometer a funcionalidade.

A operação manual ou a monitorização de um ensaio em tempo real são funções que dependem da comunicação, sendo, portanto, obrigatória a ligação.

No caso de nenhuma das funções anteriores ser necessária, a ligação entre os dois blocos pode ser terminada de uma forma normal se o BM tiver a capacidade de salvar os dados de operação num suporte não volátil. Os dados guardados podem ser transferidos e sincronizados assim que se reestabeleça a ligação. Este mecanismo permite manter uma boa imunidade a problemas de rede, podendo a última desligar-se e religar-se a qualquer instante sem perda de dados.

Um armazenamento de massa externo USB (PEN) permite que o bloco material tenha de facto a capacidade de salvar os dados de forma não volátil e para além de permitir a sincronização de dados de operação após uma interrupção da ligação também permite a transferência de dados no modo desligado, sendo estes carregados para o BL diretamente da PEN, permitindo o processamento e visualização dos dados do ensaio em diferido.

Em termos de funções assume-se que serão necessárias as apresentadas na Figura 8, onde está esquematizado quer as funções que se atribuem a cada bloco quer os elementos de entrada ou saída.

Os dois blocos interligam-se ao nível do processo informático por uma rede informática e dois protocolos distintos, TCP/IP e UDP/IP.

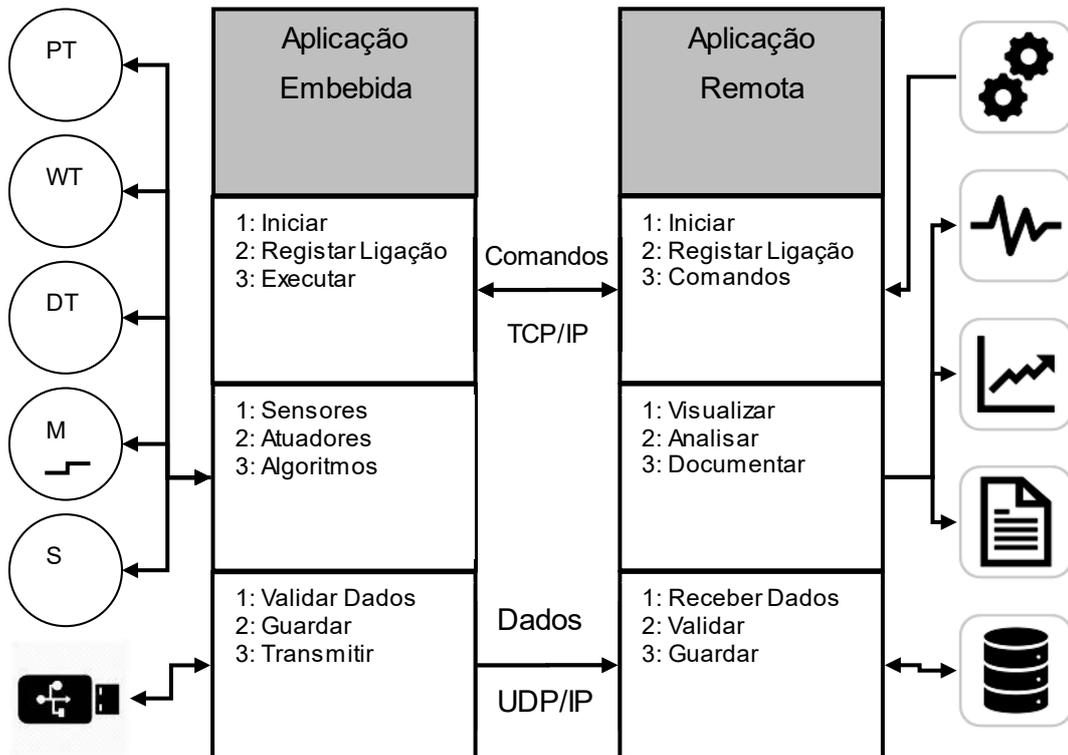


Figura 8: Esquema funcional do SETAS

Apresentada a visão geral da arquitetura do sistema e identificadas as funções a desempenhar seguem-se nas próximas seções uma descrição da arquitetura e funções de cada um dos blocos.

3.2 O bloco Material

O BM inclui todo o aparato necessário á execução de ensaios triaxiais e por natureza encontra-se imobilizado no espaço do laboratório. Como bloco, o BM é um subsistema do SETAS que funciona como sistema embebido, isto é dotado de processamento próprio e capacidade de comunicação digital, sem qualquer meio de interface com o utilizador. A função de interface de utilizador será desempenhada pelo BL por intermédio da troca de mensagens digitais.

Como sistema próprio o BM mantém a arquitetura de sistema distribuído em que os elementos constituintes são dispositivos inteligentes, isto é, dotados de processador e interface de comunicação digital.

A Figura 9 esquematiza a arquitetura do BM. Note-se que o facto das imagens serem reais indica claramente que os componentes foram fabricados até à data em que este documento foi concluído e são aqui mostrados para dar uma referência visual dos componentes que facilite o acompanhamento do discurso que se segue.



Figura 9: Arquitetura do bloco material

Como sistema distribuído, o BM é de facto constituído por vários sistemas embebidos, o controlador e quaisquer dos transdutores. Os transdutores estão incluídos na categoria de dispositivos inteligentes. A rede digital de comunicações interliga todos os elementos do bloco material e será doravante designada por Rede de Campo Digital (**RCD**). Por uma questão de simplicidade e compatibilidade a RCD eleita terá como meio físico de transmissão a rede série de 1 par diferencial, norma RS485, que permite a comunicação bidirecional, mas não em simultâneo.

O protocolo de comunicação da RCD é constituído por um conjunto mínimo de funções especificadas nas referências Modbus RTU (Modbus.org, 2006), o que implica que a

placa controladora aja como **Mestre** e quaisquer dos restante elementos pendurados na rede funcionem como **Escravos**.

O protocolo é partilhado por todos os elementos pelo que tem de ter implementações estritamente compatíveis em cada um deles.

Deste modo, o controlador coordena as operações de todos os elementos para a execução de ensaios e obtenção de resultados.

A placa controladora é um sistema embebido de controlo do BM com isolamento galvânico, com acoplamento magnético e ótico em algumas saídas digitais. O esquema eletrónico da interface de isolamento encontra-se no Anexo 9.2. No armário do controlador encontram-se também as fontes de alimentação necessárias. A Este conjunto designa-se por Controlador do Sistema (**CS**).

Os controladores de volume e pressão (**CVP**) são dispositivos de controle de volume e/ou pressão em malha fechada. Estes dispositivos apesar de serem bastante similares a nível de construção mecânica aos **CRSP**, "*constant rate strain pump*", apresentam um desempenho superior a nível de precisão e controlo. A construção dos CVP insere-os na classe de transdutores inteligentes bidirecionais, medem e controlam a pressão e o volume.

A elevada precisão de controlo vem da elevada precisão de medida associado a um controlador de motores de passo de excelência. Este dispositivo no modo normal de funcionamento serve o propósito de controlar a pressão e medir variações de volume de fluido. Como visto no capítulo 2, tem-se a necessidade de medir e controlar a pressão e o volume do fluido confinante, do fluido de carga e da água presente nos poros da amostra. No projeto final terão de existir três dispositivos destes, contudo, nesta fase apenas foi desenvolvido um para demonstração de conceitos.

O elemento identificado como PT1 (Figura 8) é um transmissor digital de pressão comercial. Este dispositivo é um sensor inteligente de última geração, compensado digitalmente em temperatura e com uma interface digital de comunicações e protocolo compatíveis como o sistema. A elevada precisão e desempenho deste dispositivo refletem-se naturalmente no custo do mesmo, um dos factos que está na origem da redefinição dos objetivos e ordem de trabalhos da presente fase.

A interface analógica foi introduzida depois da reorganização e surge como uma ponte entre os sensores analógicos, existentes em armazém, e a RCD. De facto, existem cinco

interfaces analógicas idênticas e independentes na placa de circuito impresso montada na mesma caixa de blindagem eletromagnética.

Apesar de muito provavelmente a interface analógica ser um componente temporário neste sistema - estando previsto para uma fase posterior a substituição da interface e de todos os sensores analógicos representados na Figura 8 por sensores inteligentes comerciais - o desenvolvimento da mesma reveste-se de uma importância crucial na demonstração do conceito de qualidade de dados em trabalhos de investigação.

Os sensores WT, ZT, PT2, PT3 e PT4 partilham do mesmo princípio de transdução, a piezoresistividade, isto é a alteração da resistividade que certos materiais exibem quando sofrem deformações. O que os diferencia é apenas a sensibilidade sendo que o circuito condicionador de sinal deve se adaptar automaticamente a qualquer deles.

WT e ZT, como referido no capítulo 2, desempenham respetivamente as funções de medida direta da força de carga, F_{Load} , e da deformação axial da amostra, A_{Strain} . Existe a possibilidade, pelo menos teoricamente, de virem a ser substituídas estas medidas diretas por medidas indiretas com recurso a grandezas físicas correlacionadas que serão objeto de experiências demonstrativas e serão abordadas no capítulo 7.

3.3 O bloco lógico

O bloco lógico é composto por uma peça de software, portanto de natureza intangível, que serve o propósito de interface de utilizador, terminal de configuração do BM e de monitorização de ensaios. Outras funções serão executadas em segundo plano e, portanto, transparentes ao utilizador. Sendo de natureza intangível pode se materializar num qualquer dispositivo computadorizado desde que disponha de um meio de comunicação digital com o BM.

O BL foi concebido para ser codificado numa linguagem de programação orientada a objetos (Jamro, 2018) e, existe uma organização coerente de três coleções de objetos que desempenham três funções básicas, designadamente Interface gráfica do utilizador (**IGU**), Análise e Processamento de Dados (**APD**) e Imagem Digital do Sistema (**IDS**).

Na Figura 10 está esquematizada a organização do BL nos seus três grupos funcionais que estão interligados de tal forma que um evento em qualquer deles propagar-se-á aos outros dois, eventualmente com a geração de cadeias de eventos que terminam quando for atingido o resultado pretendido.

A única parte visível do bloco lógico é a IGU, constituída por objetos visíveis no ecrã do dispositivo computadorizado. Como a função da mesma é fazer de interface entre o utilizador e o BM deve conter os indicadores dos elementos relevantes do sistema e permitir a geração de eventos por parte do utilizador, eventos estes que levem à mudança de estado do sistema como um todo.

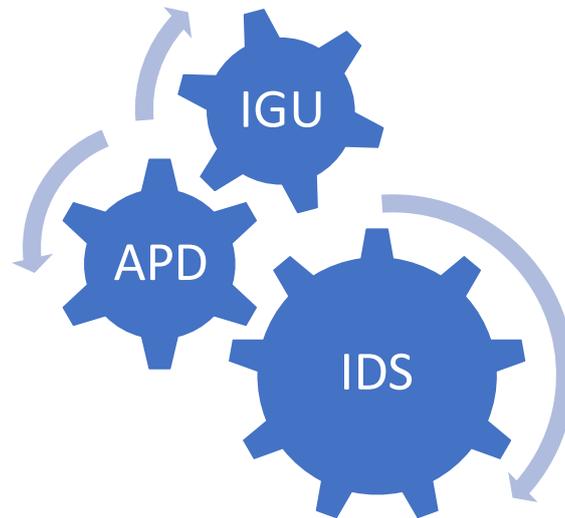


Figura 10: Organização do BL em grupos funcionais sincronizados.

Naturalmente onde existem dados existe a necessidade de se executar algum tipo de processamento. Este processamento será executado dentro do APD.

O IDS é o núcleo do BL porque consiste numa coleção de representações digitais de todos os elementos constituintes do sistema. Um algoritmo de sincronização entre o BL e o BM permite que uma operação sobre a imagem digital de um objeto leve a que a alteração se reflita no objeto real. De modo análogo, uma alteração do objeto real será sincronizada com a sua imagem digital e eventualmente nos objetos gráficos que são os seus indicadores na IGU.

No capítulo 5 será demonstrado que o utilizador não poderá alterar as propriedades do objeto virtual de modo direto, sendo necessária a confirmação de que a alteração foi concluída com sucesso no objeto real para que a alteração no objeto virtual possa ser efetiva.

3.4 A rede digital de Informação

A rede digital de Informação (**RDI**) pode ser uma qualquer rede que suporte o protocolo IP (“Internet Protocol”), como exemplo a rede sem fios Wi-Fi ou a rede cablada ETHERNET (Lammermann, 2008).

Neste ponto tiveram de se ponderar os prós e contras de cada uma das tecnologias. A inexistência de cabos seria muito vantajosa na instalação do BM, esta característica é inerente à rede Wi-Fi. A fiabilidade e o baixo custo de uma rede cablada são vantagens a favor da ETHERNET.

Até aqui nenhuma das tecnologias tomou a dianteira, contudo, o facto de existir uma rede local (LAN) instalada no espaço do laboratório fez pender a decisão para a ETHERNET.

Uma outra vantagem é a longevidade esperada para a tecnologia ETHERNET que é a tecnologia de maior implementação em redes de informação a nível global. Esta implementação maciça permite estimar que continuará em uso por um longo período, da ordem de duas décadas. Uma outra vantagem da implementação maciça é o reduzido custo pelo simples facto de os componentes dedicados serem produzidos em enormes quantidades.

Pelo acima exposto, a escolha natural para a **RDI** recai sobre a ETHERNET.

4 Desenvolvimento do bloco material

O BM como foi concebido no capítulo anterior requer um conjunto extra de componentes e circuitos para executar a sua função. Na Figura 11 está representado um diagrama de tubagens e instrumentação (**P&ID**) do BM.

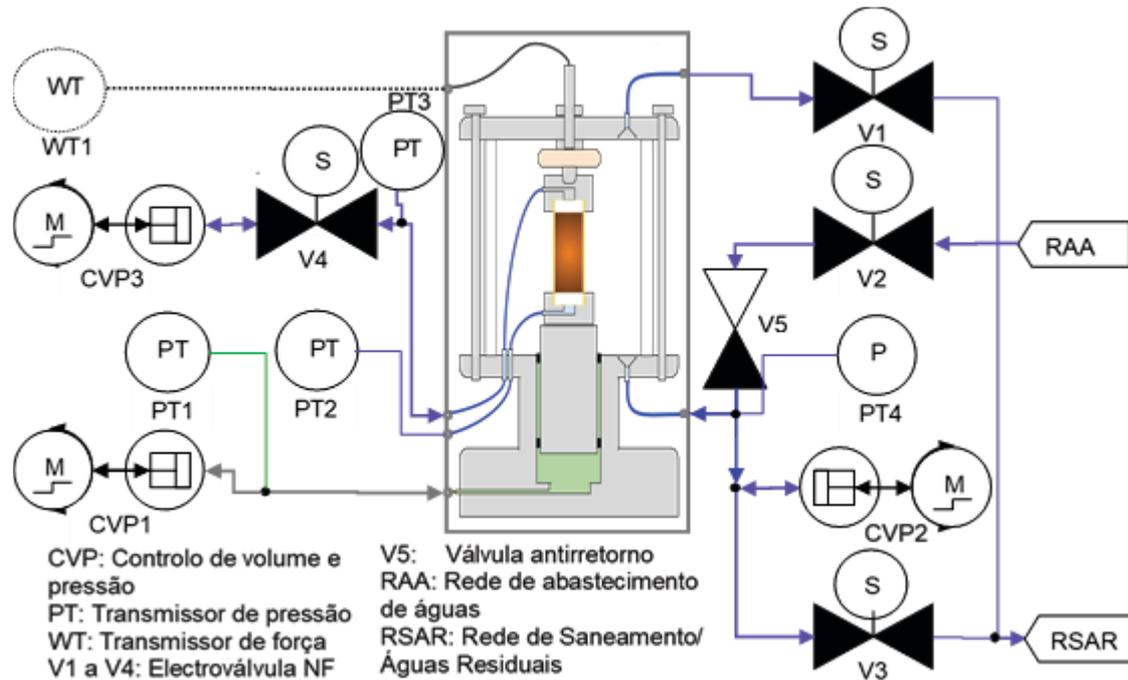


Figura 11: Diagrama de Tubagens e Instrumentação (P&ID) do BM.

Para além dos dispositivos apresentados no capítulo anterior, no contexto de sistema distribuído, aparecem também atuadores binários, neste caso electroválvulas, V1 a V4, que podem ser vistas como extensões da placa controladora. Aparecem no diagrama os transdutores inteligentes cuja ligação é feita de acordo com a arquitetura apresentada na Figura 9 e que é omitido neste diagrama.

Neste ponto estão definidos quer os componentes quer as ligações dentro do BM. Nas secções seguintes será apresentada uma memória descritiva e justificativa de cada um dos componentes que foram desenvolvidos numa perspetiva do particular para o geral.

Na secção 4.1 apresenta-se a interface analógica/digital onde o foco principal é a qualidade de dados, de especial relevância num instrumento de investigação, fazendo-se um paralelo com dispositivos comerciais de alta precisão sempre que seja do interesse da clarificação dos conceitos envolvidos. Este componente irá ser desenvolvido como de uso geral, temporário nesta utilização, diferentemente dos restantes elementos do sistema que são específicos e definitivos nas suas aplicações.

Na secção 4.2 apresenta-se o controlador de volume e pressão, que por medir e controlar o volume e a pressão de fluido no circuito em que se insere, considera-se um transdutor bidirecional de alta precisão.

Finalmente, na secção 4.3 apresenta-se o controlador do sistema embebido que torna de facto possível coordenar todos os dispositivos do bloco material para a execução de ensaios triaxiais de solos.

4.1 A interface Analógica/Digital

Dentro do conjunto de componentes do sistema de ensaios triaxiais em desenvolvimento, a interface analógica/digital é apenas uma solução temporária que irá permitir a utilização de sensores analógicos (de baixo custo) para demonstração de conceitos, sendo estes substituídos à posteriori por sensores inteligentes comerciais (de elevado custo) se for demonstrada a sua necessidade. No entanto, a aplicabilidade deste componente não termina por aqui, pois sendo fácil de utilizar e ajuste automático à sensibilidade do elemento sensor, pode ser utilizado em aplicações particulares como complemento ao SETAS. Os módulos IAD podem ser instalados em serie na RDC por se terem previsto conetores de entrada e saída.

No contexto de Dissertação de Mestrado em Instrumentação tem uma importância especial na demonstração do conceito de qualidade dos dados para investigação - envolvendo resolução, precisão e repetibilidade – o número de algarismos significativos, independentemente do nível da grandeza a medir e da sensibilidade do sensor.

Como ponto de partida tome-se os resultados obtidos pelo sensor de pressão de alta precisão PAA33X, fabricado pela KELLER AG. A sua imagem aparece na Figura 12, imagem que está disponível ao publico na página WEB do produto.

Este é um sensor de pressão absoluta, referência ao vácuo, de precisão indicada pelo fabricante como sendo de 0.05% do fundo de escala que neste caso é de 1MPa. A precisão define a amplitude máxima da componente aleatória presente no sinal.

Para se verificar se de facto a precisão se confirmava fez-se um conjunto de 25000 amostragens consecutivas da pressão atmosférica.



Figura 12: PAA33X. Cortesia da KELLER AG

Na Figura 13 apresentam-se os resultados da medida periódica, com período 4ms, da pressão atmosférica durante um intervalo de 100s.

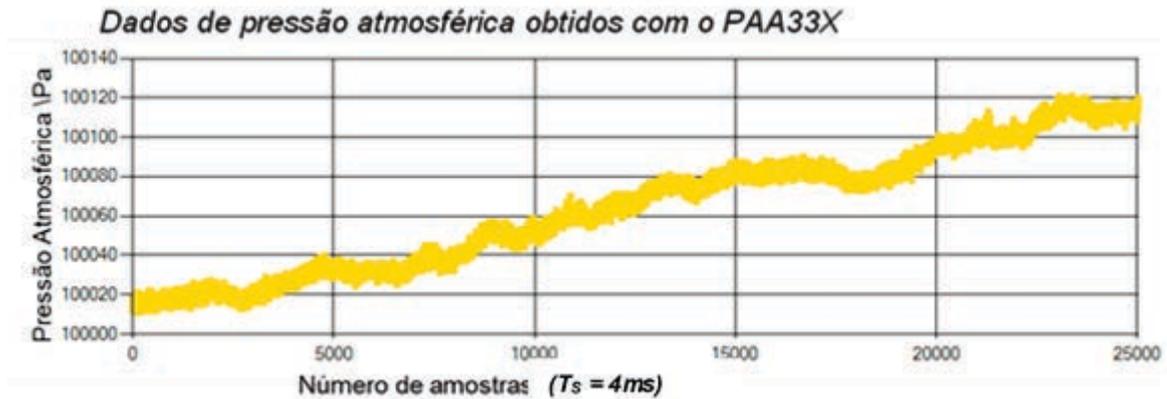


Figura 13: Gráfico da Pressão atmosférica obtida pelo PAA33X

Da análise do gráfico obtém-se duas conclusões interessantes, a pressão ambiente apresenta uma grande variabilidade, superior a 100Pa/100s, e a dispersão de valores numa qualquer linha vertical do gráfico tem uma amplitude de aproximadamente 10Pa.

A pressão atmosférica depende da latitude e da altitude onde é medida, facto que por si só não é um problema pois é determinística, contribuindo com uma parcela fixa para a medida de sinal. O maior problema surge da dependência climática que é de natureza caótica, contribuindo para a medida com uma parcela variável de média não nula.

A presença da dispersão de valores num intervalo de amplitude de 10Pa confirma a precisão indicada pelo fabricante, mostrando-se inclusive melhor que a declarada que é de 0.01% e a observada é de 0,001% do fundo de escala (1MPa).

A variabilidade de 100Pa/100s torna-se um fator de incerteza nos sensores manométricos que como se sabe são sensores ventilados e que têm como referência a pressão atmosférica. Como já se tinha comentado no capítulo 2, é desaconselhável o uso de elementos sensores de referência à pressão atmosférica porque esta variabilidade não pode ser cancelada e propagar-se-á na cadeia de cálculos subsequentes introduzindo uma elevada incerteza no resultado.

O uso de um sensor de pressão selado, de referência ao vácuo ou a 100kPa, pode introduzir desvios na medida, contudo estes podem ser cancelados se assim for necessário pois são constantes.

Sem ter um padrão de referência nada se pode constatar relativamente à exatidão das medidas, isto é, a distância máxima a que uma medida pode ficar do verdadeiro valor.

O sensor PAA33X é o padrão no desenvolvimento da IAD, pois demonstrou de facto a sua precisão e o seu desempenho adequado num laboratório de investigação. A possibilidade de todos os sensores de pressão do sistema virem a ser substituídos por este implica naturalmente que o protocolo de comunicações seja estritamente compatível, tornando a substituição direta.

Dentro da arquitetura BM, a IAD insere-se como um módulo de 5 canais de interface, os quais são dispositivos computadorizados e dotados de capacidade de comunicação.

O facto de o elemento sensor estar fisicamente separado do condicionador/digitalizador não impede a identificação do conjunto como um sensor inteligente, visto que após calibração do conjunto, este irá funcionar como um sensor inteligente.

Nesta fase do projeto existe a necessidade de utilização de três sensores de pressão, um de deslocamento e uma célula de carga. Estes sensores partilham o princípio de transdução em ponte resistiva completa de sensores de efeito piezo-resistivo, no entanto, os elementos sensores apresentam diferentes sensibilidades.

O desafio aqui é, portanto, desenvolver um circuito de fácil configuração que suporte todos os transdutores acima enumerados, sem que seja necessárias alterações de hardware ou software.

Do ponto de vista do investigador, a qualidade dos dados obtidos, precisão e exatidão, revestem-se de extrema importância pelo facto de estes dados serem a matéria prima para cadeias de cálculo no procedimento de análise. Após a medida, os valores das grandezas são representados num formato numérico que traduz a exatidão da medida em algarismos significativos. Para que o resultado apresente uma boa significância é necessário garantir essa mesma significância na aquisição.

Propõe-se aqui indexar a incerteza da medida ao próprio valor e garantir que esta se encontra abaixo de um limite máximo de incerteza, qualquer que sejam as condições de funcionamento regular. Toma-se como premissa uma incerteza máxima de 0,001% do valor da medida, o que está razoavelmente de acordo com os resultados experimentais obtidos com o sensor PAA33X.

A significância ser independente do valor leva-nos de imediato ao formato *float* (vírgula flutuante de precisão simples, norma IEEE754 (Committee, 2008)), cujo valor na base decimal é dado pela expressão $X_d = (-1)^s \cdot 1, m \cdot 2^e$, sendo *m* (mantissa) a parte fracionária de 23 bits de resolução. No formato *float* o 24^o bit é sempre 1 e está implícito. O expoente

e é representado em 8 bits com desvio de 127. **S** é o bit sinal, sendo 0 para sinal positivo e 1 para sinal negativo.

A representação do zero é feita através de todos os bits a 0 com eventual exceção do bit de sinal.

Uma outra característica interessante deste formato é a existência de um conjunto de combinação de bits que não tendo representação numérica, designados usualmente por NaN (“Not a Number”), se prestam ao transporte de informação sobre a falha que causou este resultado. Definindo códigos personalizados para as falhas possíveis, pode-se na mesma operação de leitura obter-se o valor ou na sua ausência a razão da falha. Esta estratégia simplifica as comunicações evitando o sobre carregamento da rede com leituras de diagnóstico.

O formato **float** é uma representação binária do formato científico (base decimal), isto é, 23 bits de parte fracionária em binário correspondem em decimal a 7 algarismos significativos.

A busca por um digitalizador adequado leva-nos de imediato a um ADC de 24 bits. Ainda assim, persiste o problema da dependência da significância com o nível do sinal, que pode ser devido à gama dinâmica da variável em questão ou a características intrínsecas do transdutor, em especial a sensibilidade.

A utilização de um amplificador de instrumentação de alta estabilidade permite a adequação do nível do sinal. Escolhendo o ganho adequado para que o resultado da conversão esteja contido no intervalo $]2^{20}, 2^{24}[$ garante uma resolução superior a 1ppm.

A resolução e o ruído intrínseco do sensor, em conjunto, definem a precisão do instrumento. A precisão limita a capacidade de calibração e consequentemente a significância do resultado. Recorde-se a premissa de uma incerteza máxima de 0,001% do valor da medida, que é dez vezes superior à resolução mínima do resultado da conversão. Dependendo do nível de ruído pode-se obter um valor com cinco algarismos significativos acrescido de um algarismo duvidoso. O algarismo duvidoso é um algarismo que pode variar dentro de um intervalo centrado nele próprio.

A escolha do ganho pretende-se que seja feita de forma automática, sem recurso a manipulação de hardware, implica que o amplificador de instrumentação inclua circuitos complementares de seleção de ganho, com ganhos fixos e calibrados durante o fabrico do circuito integrado. O ganho naturalmente será o necessário para que o resultado da

conversão ADC24 caia no intervalo acima indicado. A seleção do ganho deverá ser executada automaticamente no firmware do sensor inteligente.

Por uma questão de facilidade de leitura por humanos escolheu-se os ganhos 1, 10, 100 e 1000. Naturalmente que ganhos em potências de dois seriam mais adequados ao processamento digital (binário), admitindo-se que seja o caminho a tomar numa revisão para otimização do sensor inteligente.

Para garantir que o resultado da conversão tenha pelo menos seis algarismos significativos e uma comutação estável tem de existir um intervalo em que se sobreponham as curvas características para ganhos adjacentes dentro do intervalo anteriormente definido, sendo possível criar um ciclo de histerese com pontos de comutação diferentes na subida e na descida do sinal.

Na Figura 14 encontra-se uma representação da previsão do resultado do ADC24 em função do ganho. Para se obter uma maior clareza, a representação é feita em Log-log, sendo neste caso o declive independente do ganho, mantendo-se a linearidade.

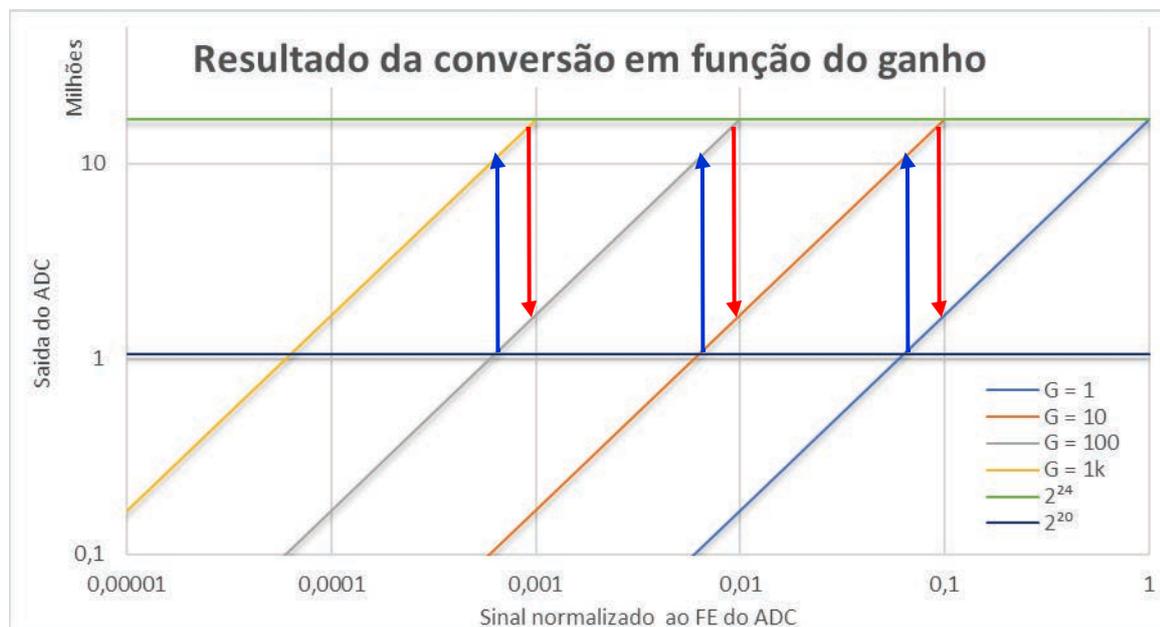


Figura 14: Previsão do comportamento do ADC24 em função do ganho.

Os ganhos estão representados na figura como **G** e no eixo dos **XX** estão os valores do sinal a medir normalizados ao fundo de escala (**FE**) do ADC, neste caso tem-se uma entrada unipolar pelo que o FE corresponde ao limite máximo de entrada do ADC.

Sendo o objetivo a obtenção de um resultado compreendido entre 2^{20} e 2^{24} , verifica-se a existência de zonas com as propriedades acima enunciadas estando representadas com setas azuis a comutação do ganho na descida do sinal e a vermelho na subida do sinal.

Feita a análise dos fatores limitantes e apontado o caminho a seguir no desenvolvimento da interface analógica, segue-se naturalmente a escolha dos componentes eletrônicos e interligações entre eles, que garantam o funcionamento adequado.

Como o sinal da ponte é diferencial com uma tensão de modo comum de aproximadamente metade da tensão de excitação e muito sensível a cargas externas, achou-se adequado usar um amplificador de instrumentação que no primeiro estágio tenha um buffer de alta impedância de entrada, seguido de um amplificador diferencial que elimine a tensão de modo comum.

Naturalmente que o ganho, digitalmente programável e calibrado durante o processo de fabrico tem três vantagens:

- ✓ Precisão no valor real do ganho, obtido com ajuste laser do valor das resistências durante o processo de fabrico
- ✓ A estabilidade térmica que se deve ao fato de os componentes serem internos ao circuito integrado, não havendo neste caso grandes gradientes de temperatura
- ✓ O Efeito do envelhecimento dos componentes, isto é a sua degradação ao longo do tempo, é minimizado pelo fato de serem idênticos e sujeitos às mesmas condições. Num circuito compensado um desvio num dos componentes é seguido por um desvio em sentido oposto de um componente simétrico, mantendo-se a condição de neutralidade.

Apesar dos amplificadores de instrumentação de ganho programável (**AIGP**) existentes no mercado terem um elevado fator de rejeição de flutuação na tensão de alimentação (>100dB), serem alimentados com uma fonte estabilizada melhora o desempenho do circuito. As pontes resistivas têm uma sensibilidade ratiométrica pelo que é imperioso alimentar a ponte com uma tensão de alta estabilidade. Neste caso a mesma fonte estabilizada de 5 VDC será usada quer na excitação da ponte quer na alimentação do AIGP.

O conhecimento de que as grandezas físicas a medir são unipolares, a pressão positiva por definição, o deslocamento e forças que levem a uma diminuição de volume da amostra são positivas por convenção, leva à conclusão que a saída do AIGP pode ser única (com referência à massa), no entanto para tornar o uso deste modulo o mais geral possível

previu-se a possibilidade de aquisição de sinais bipolares, ajustando o nível de tensão de modo comum da saída. Este ajuste será realizado por inclusão de uma resistência no circuito de referência da saída do AIGP, sendo que a placa de circuito impresso se encontra preparada para essa alteração.

Para o ADC24 escolheu-se um componente microcontrolador de sinal misto, com 3 circuitos ADC24 independentes e de características semelhantes. O primeiro ADC24 executa a conversão do sinal. O segundo monitoriza a tensão de excitação da ponte; lembre-se que a saída da ponte é ratiométrica e, portanto, dependente da tensão de excitação. O terceiro monitoriza a tensão de modo comum do sinal e visa a detecção de defeitos do elemento sensor.

O microcontrolador MSP430AFE253 (Texas Instruments, 2018) foi o componente escolhido. A alimentação analógica do microcontrolador deriva da tensão de excitação da ponte por meio de uma componente de tensão de referência de 3,3VDC garantindo deste modo uma estabilidade superior na alimentação analógica do ADC24. A baixa corrente de saída da tensão de referência não é um fator limitante pelo fato do consumo ser menor que 1mA.

As massas, analógica e digital estão unidas apenas num ponto através de uma ferrite de desacoplamento que impede a propagação de componentes digitais de alta frequência para o circuito analógico.

Anteriormente foi abordado o facto de o ganho do AIGP ser digitalmente programável, sendo que os sinais dados pelo circuito digital têm de ser levados até ao AIGP que por natureza é analógico. Também aqui existe o potencial de interferência entre o circuito digital e o analógico, pelo que se inseriu um isolador digital permitindo deste modo manter os dois circuitos separados.

A alimentação digital é providenciada por um conversor DC-DC dada a necessidade de grandes correntes. O conversor DC-DC de alto rendimento limita substancialmente a produção de calor na placa e, portanto, a deriva térmica dos circuitos.

Sendo um sistema embebido apenas terá como meio de comunicação com o exterior uma porta série assíncrona (UART) sendo, neste caso, necessário a conversão dos níveis de sinal para a Norma RS485 visto este ser o suporte físico da rede idealizado durante a conceção do sistema.

A Figura 15 apresenta um esquema em blocos da IAD que resume a análise efetuada nos parágrafos anteriores. O esquema eletrônico encontra-se em anexo na seção 9.1.

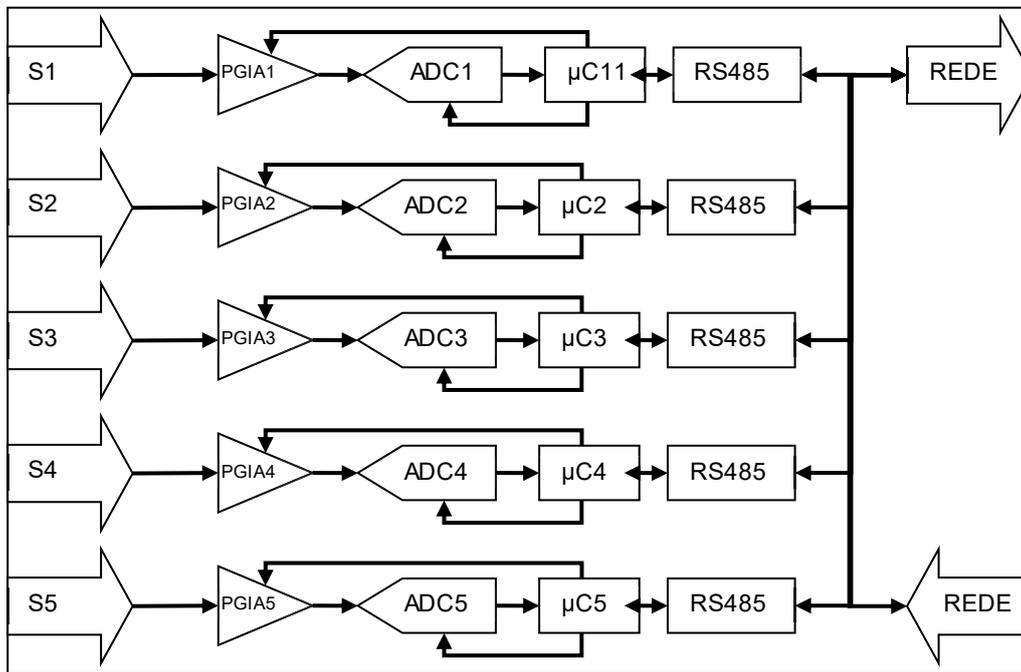


Figura 15: Esquema de blocos da IAD.

Na Figura 16 apresenta-se uma imagem real da IAD depois da montagem na caixa e na Figura 17 o protótipo da placa de circuito impresso ligada aos conectores.



Figura 17: Imagem exterior da IAD.

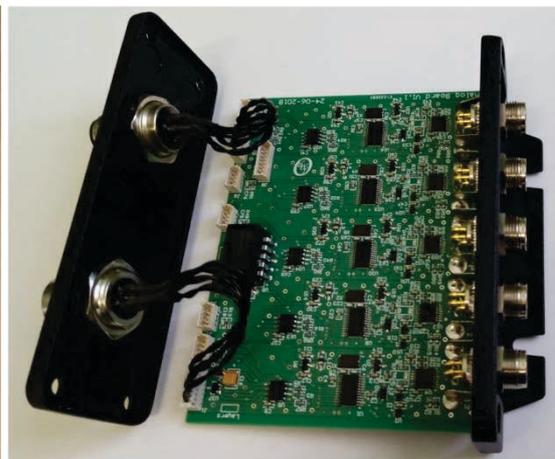


Figura 17: Imagem do protótipo IAD.

Por o tempo disponível ser limitado não foi possível desenvolver o firmware que irá correr nos microcontroladores e por consequência também não foi possível fazer a calibração e a demonstração do seu funcionamento. Também algumas das experiências para demonstração não serão possíveis de realizar por dependerem desta interface.

4.2 Controlador de volume e pressão

O controlador de volume e pressão (CVP) é uma evolução da CRSP atualmente em uso nos sistemas existentes. Não se trata aqui de nenhum conceito novo, mas sim um desenvolvimento no sentido de se tornar um transdutor bidirecional inteligente, robusto e de alta precisão.

O CVP é um híbrido entre um atuador linear por fuso de esferas controlado por um motor de passo acoplado a um cilindro hidráulico.

Neste sistema de ensaios o CVP ocupa uma posição de grande responsabilidade, daí o esforço aplicado no desenvolvimento de um dispositivo robusto e de alta precisão.

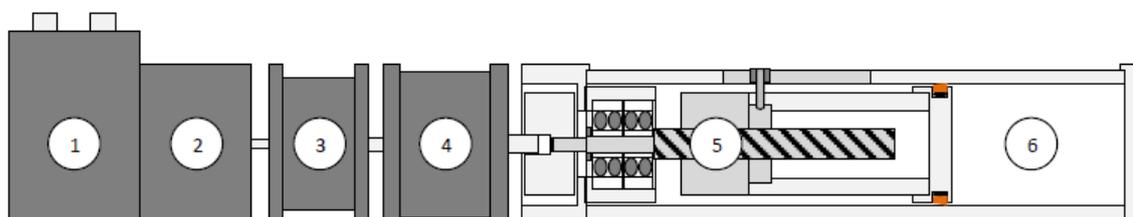


Figura 18: Esquema de componentes da CVP

Na figura 18 encontra-se esquematizado os seus componentes pela ordem em que serão montados.

Os componentes 1 a 5 são componentes comerciais e o 6 terá de ser projetado e fabricado.

Os componentes 1 e 2 são os dois blocos do motor integrado MIS232. Este motor integra um controlador em malha fechada com encoder absoluto multi-voltas. Tem três modos de funcionamento, nomeadamente velocidade, posição e torque. O torque máximo é de 1,6Nm. A resolução do controlador é de 409600PPR (impulsos por revolução) garantindo um movimento suave e silencioso.

O encoder absoluto multi-voltas tem uma resolução de 4096PPR (5,3arcmin). Permite o funcionamento em malha fechada e a retenção do valor da posição absoluta por bateria de salvaguarda (mesmo sem alimentação) por um período superior a 15anos, segundo indicação do fabricante.

O controlo em malha fechada é feito pela posição e velocidade do encoder, no entanto a posição é indicada em passos do motor, com uma resolução 100 vezes superior.

O travão magnético, componente 3 da Figura 1, funciona como bloqueio permitindo deste modo reter a posição sem alimentação do motor.

A caixa redutora, componente 4 da Figura 18, desmultiplica o movimento de rotação por uma relação de 12:1 permitindo deste modo uma resolução de 0,44arcmin. O torque de entrada aparecerá à saída aproximadamente multiplicado pelo mesmo fator (forças de atrito reduzidas por lubrificação a óleo), sendo no máximo 19Nm. Apresenta uma folga de 15arcmin, teoricamente sempre que a direção do movimento for invertida irá ter uma histerese igual á folga. Neste caso em particular não se prevê que esta histerese se observe na prática pelo facto de o sentido da carga nunca inverter.

O fuso de esferas, componente 5 da Figura 18, tem um diâmetro externo de 16mm, 5mm de passo e na configuração em que será instalado, funciona com cargas axiais de 22kN no máximo (carga estática ou quase-estática). A relação entre a carga e o torque é dado pela Equação 1, sendo T_d o torque em Nm, F_a a carga axial em kN, P_h o passo da rosca em mm e η a eficiência de conversão (valor especificado pelo fabricante como sendo de 90%).

$$T_d = \frac{F_a \cdot P_h}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} \quad (1)$$

Será necessário aplicar um torque de 17Nm para uma carga de 22kN, valor que nunca irá ser atingido porque este não é o elemento limitante como veremos a seguir.

O flange de fixação do fuso de esferas contém um par de rolamentos de contacto angular, 40° de ângulo, na configuração unidirecional (TANDEM) conseguindo deste modo suportar até aproximadamente 14kN de compressão.

O acoplador de veios existente entre o fuso de esferas e a caixa redutora está especificado para suportar um torque máximo de 10Nm. Pela Equação 1, este torque aplicado ao fuso de esferas proporciona no máximo 13kN de carga axial. Este é o elemento limitante das especificações de valores absoluto máximos do CVP. O acoplador funciona como proteção mecânica do CVP além, naturalmente de funcionar como acoplamento de veios.

O cilindro hidráulico, componente 6 da Figura 18, tem 40mm de diâmetro interno e foi concebido para ter um curso de 100mm. A área do pistão é de 12,566cm² sendo o volume interno da câmara de 125,66cm³.

Como visto anteriormente, a carga axial máxima é limitada pelo acoplamento ao valor de 13kN. A pressão de fluido necessária para gerar esta força sobre a superfície do pistão é de 10MPa (100bar).

O movimento rotativo do motor é convertido para movimento linear no fuso e como se tem uma resolução de 4096PPR no encoder, uma relação de 12:1 de caixa e um passo de 5mm de rosca, a resolução linear do êmbolo é de 0,10 μ m e volumétrica de 0.13mm³.

No caso de se usar a contagem de passos do motor nos cálculos anteriores, 409600PPR, obtém-se para a resolução linear o valor de 1nm. Esta valor é válido uma vez que é corrigido a cada impulso do encoder.

A incerteza na medida de deslocamento do pistão através do encoder deve-se principalmente à precisão da rosca, neste caso com um curso de 100mm é de 7 μ m no máximo podendo naturalmente ser calibrado para se obter uma precisão superior.

O motor pode funcionar a velocidades de 0.01RPM até 500RPM o que corresponde aproximadamente em deslocamento linear do embolo respetivamente de 4 μ m/min até 3mm/s.

O comando do CVP faz-se através de um protocolo baseado nas referências Modbus RTU. Note-se que este protocolo é partilhado por todos os dispositivos inteligentes pendurados na RDC sendo que o **Mestre** é o controlador do BM.

Na Figura 19 apresenta-se uma imagem do protótipo do CVP.



Figura 19: Imagem final do protótipo do CVP.

4.3 O controlador do sistema

O controlador do sistema (CS) coordena todos os dispositivos no BM para execução de ensaios.

O controlador está montado num armário de instrumentação que inclui as fontes de alimentação de todo o sistema bem como proteção por fusíveis de todas as linhas de alimentação, nomeadamente:

- ✓ Alimentação da Rede de Campo, 12VDC/1A.
- ✓ Alimentação da Placa Controladora, 12VDC/500mA.
- ✓ Saídas Digitais Monoestáveis, 8x24V/1A.
- ✓ Saídas Digitais Biestáveis; 3x24V/6,3A.

Na figura 20 apresenta-se um diagrama de blocos do controlador do sistema que inclui alimentações, placa controladora, interface de isolamento e bateria de salvaguarda.

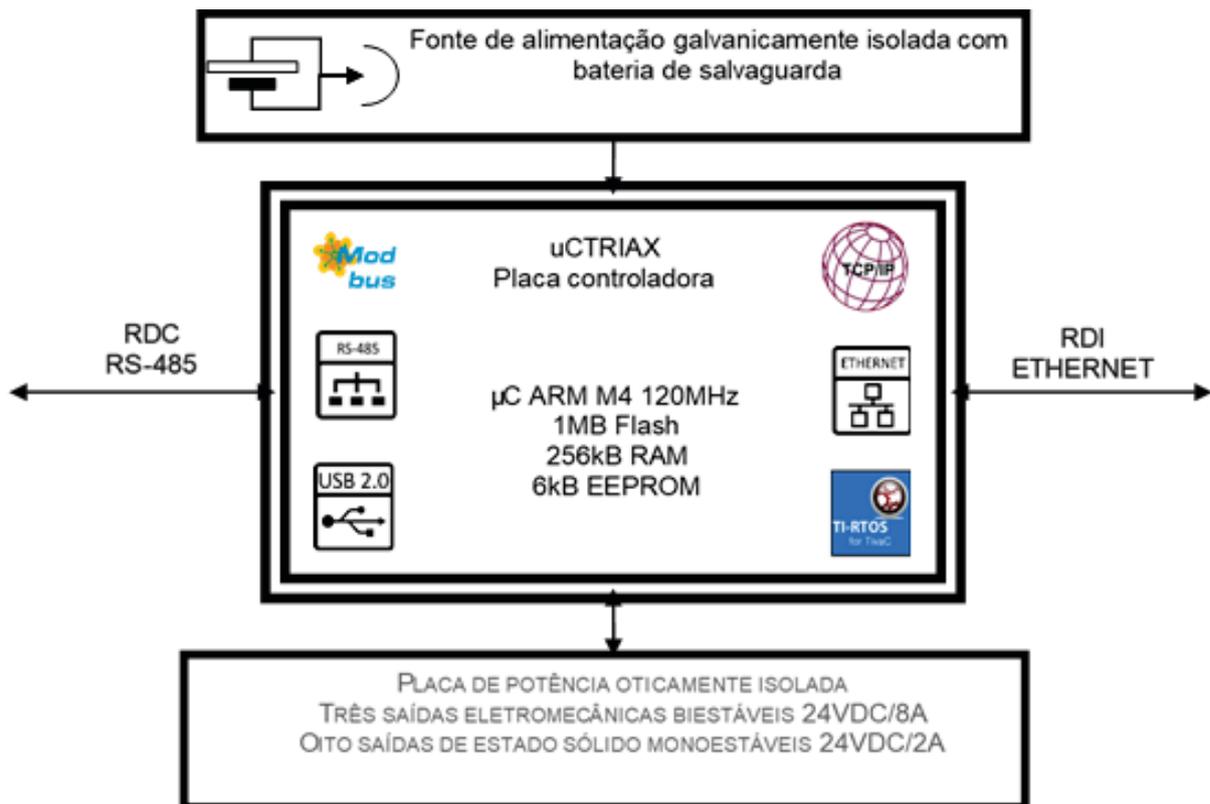


Figura 20: Diagrama de blocos do Controlador do Sistema .

A Placa Controladora é uma placa de avaliação do microcontrolador TM4C1294CPNDT (Texas Instruments, 2014) da Texas Instruments, que possui todo o hardware necessário para a rede Ethernet, USBHost e conetores de expansão placa-placa.

O microcontrolador funciona a uma frequência de relógio de 120MHz, possui 1MB de Memória Flash, 256kB de memória RAM, 6kB de Memória EEPROM. Com estas características é possível instalar um sistema operativo de tempo real (RTOS), cujas premissas de tempo real permitem de uma forma simplificada o desenvolvimento de software altamente diferenciado, com ganhos em tempo de desenvolvimento, depuração e implementação.

Uma vantagem no uso de sistema operativo RTOS é a programação ser feita sobre uma camada de abstração de hardware que permite a migração para outras plataformas sem grandes alterações de software da aplicação.

Para tornar a Placa Controladora imune a condições externas potencialmente destrutivas, esta vai assentar numa interface de isolamento através dos conetores placa-placa existentes na placa de avaliação, sendo que esta ficará isolada, quer a nível de alimentações quer de sinais.

Da Interface de Isolamento partem todos os circuitos que são encaminhados para o exterior por conetores circulares industriais, garantindo assim um acoplamento de qualidade superior.

Dispostos num painel amovível encontram-se os conetores. A imagem do painel encontra-se na figura 21.



Figura 21: Painel de conetores do CS.

Como qualquer sistema informático pode ser corrompido e entrar num funcionamento erróneo adicionou-se um interruptor para forçar a reinicialização do microcontrolador.

A ligação USB é feita no conector USB2.0 e serve para a instalação de uma PEN.

O conector RJ45 serve para fazer a ligação Ethernet de 4 pares entrançados (UTP/STP).

Os conectores circulares industriais roscados M12/5P servem para se estabelecer ligações à rede de campo. Para além do par diferencial RS-485, estes conectores também providenciam a alimentação de 12VDC dos sensores inteligentes. Os três conectores encontram-se ligados em paralelo para se poder executar a cablagem da rede de campo da forma que for mais adequada.

Os conectores circulares industriais roscados M8/3P servem para fazer a ligação dos atuadores binários, neste caso, as electroválvulas (aberto/fechado). Para além do sinal de 24VDC e a massa, neste conector está disponível a terra de proteção.

Os conectores XLR, são conectores de alimentação de potência de atuadores. Os conectores XLR foram originalmente concebidos para sistemas de áudio, apresentam características de corrente máxima de 16A e blindagem eletromagnética, características importantes na alimentação de circuitos digitais de potência, como é o caso dos motores de passo. Nestes conectores encontram-se disponíveis: 24VDC, massa e terra de proteção.

O desenvolvimento do software embebido foi feito no **Code Composer Studio** (CCS) da Texas Instruments e o sistema operativo eleito foi o **TI-RTOS** (Texas Instruments, 2018). Como quer a placa de avaliação, o sistema operativo e a ferramenta de programação, são todos do mesmo fabricante, apresentam uma compatibilidade amplamente testada, e controladores de hardware prontos a utilizar e de utilização livres, dos quais se dão totalmente os créditos à Texas Instruments.

A estrutura do software embebido é apresentada na Figura 22.

A gestão do sistema fica a cargo da tarefa designada por **Gerir**, todas as outras tarefas são comandadas pela primeira com recurso a trocas de mensagens por caixa de correio.

O protocolo da rede de campo é um subconjunto das referências Modbus RTU. Apenas foram implementadas as funções F03, F06, F08 e F016. A placa controladora irá funcionar como mestre da RDC.

Verifica-se da estrutura do software que os recursos RDC podem ser utilizados por várias tarefas. Para impedir que ocorram acessos anómalos, estes são controlados por semáforos.

Os protocolos de comunicações, ligação com o bloco lógico, são diferentes para comandos e dados. Para garantir que os comandos são entregues e mantêm a integridade da mensagem, será usado o protocolo TCP/IP, orientado à ligação. O transporte de dados fará uso do protocolo UDP/IP, que apesar de não garantir a entrega ou a ordem das mensagens, é mais simples de utilizar e menos consumidor de recursos. A ordem das mensagens é garantida pelo um selo temporal. A perda de um pacote de dados numa série temporal com largos milhares ou até milhões de dados é irrelevante para o resultado.

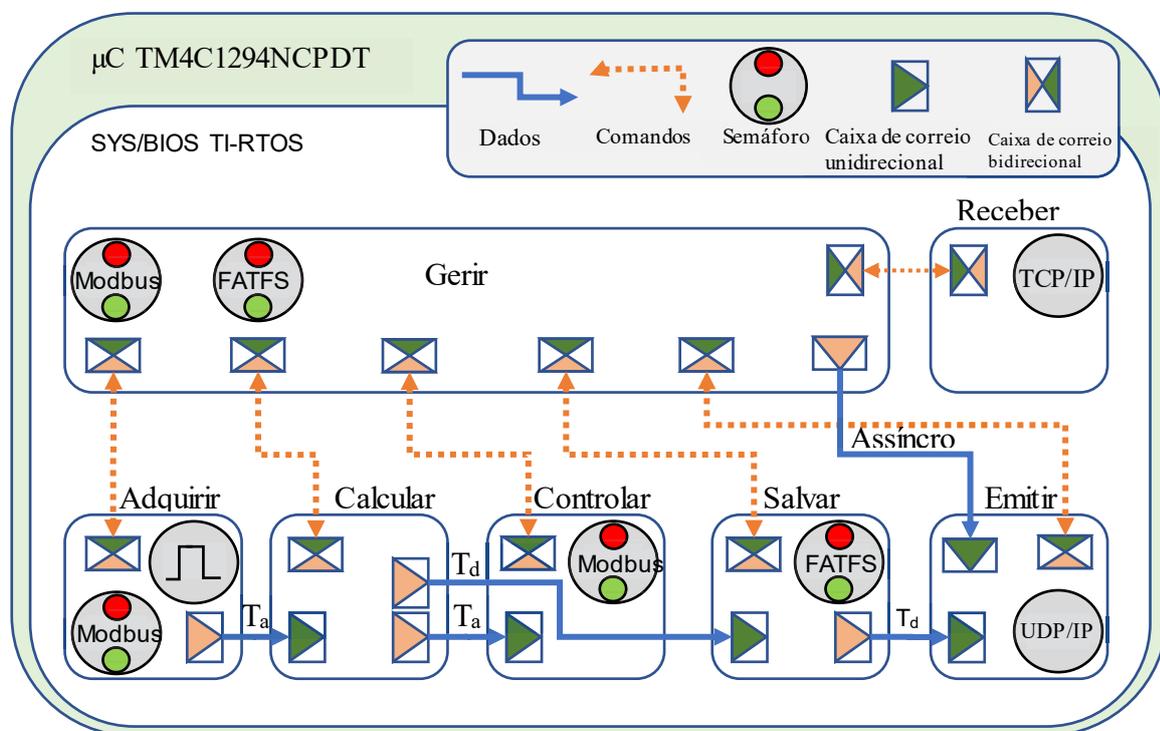


Figura 22: Estrutura do software embebido.

Um outro facto para o uso de protocolo UDP/IP é a capacidade de transmissão para vários recetores em simultâneo, visto ser um protocolo orientado à rede e não à ligação. Por uma questão de disponibilidade de recursos limitou-se o número de recetores em simultâneo a um máximo de 5.

Os dados adquiridos nos sensores serão lidos sobre a rede de campo a cada 10ms. As variáveis de campo, medidas por sensores, são encaminhadas por caixa de correio, para a tarefa de cálculo. Nesta tarefa são calculados os valores das variáveis indiretas. As

variáveis de campo e as variáveis indiretas são encaminhadas à mesma taxa de amostragem para a tarefa de controlo. Na tarefa de controlo este conjunto de dados é a “matéria-prima” de algoritmos de controlo de atuadores.

Na sequência do encaminhamento do conjunto de valores para a tarefa de controlo, cada uma das variáveis é acumulada durante um determinado número de amostras definido pelo utilizador.

Quando a acumulação atingir um número definido de amostras, será dividido pelo n^o de amostras, obtendo-se deste modo o valor médio das variáveis.

O período de dados é dado por $T_d = n \times T_a$, e a frequência de dados $f_d = 1/T_d$, onde T_d é o período de dados, f_a a frequência de dados, n o número de amostras e T_a o período de amostragem.

Deste modo consegue-se configurar a frequência de dados, sem alterar a frequência de amostragem e, portanto, sem interferir com os algoritmos de controlo. Uma outra vantagem desta abordagem é o cancelamento das componentes de ruído presentes nos sinais, desde que estes sejam aleatórios e de média nula. O período de dados pode facilmente atingir um qualquer valor múltiplo do período de amostragem.

Atribuindo o valor médio do intervalo em que se calcula a média como a marca temporal do valor da média, o que é o mais lógico, implica que os dados sejam apresentados com um atraso de meio período relativamente ao instante da apresentação.

Pode ser um problema em alguns cálculos ou cadeias de cálculos posteriores, sendo necessário verificar cada caso em particular.

Os valores médios das variáveis, de campo e indiretas, são encaminhados em simultâneo para a tarefa de salvaguarda e de emissão UDP/IP.

Se existir uma PEN instalada, e no caso de estar a decorrer um ensaio, os dados são guardados na PEN em formato binário sequencial, isto é, os bytes são escritos sequencialmente na memória externa sem qualquer tipo de processamento. A PEN tem de estar formatada com um sistema de ficheiros FAT, que pode ser FAT16 ou FAT32, para ser reconhecida. Na ausência de PEN o encaminhamento dos dados é inibido na tarefa de cálculo. Os mesmos dados que são encaminhados para a tarefa de salvaguarda são também encaminhados para o emissor UDP/IP. Existindo recetores registados, os dados serão emitidos. No caso de não existirem recetores o encaminhamento para o emissor é inibido na tarefa de cálculo. Repare-se que qualquer das opções, guardar ou

emitir, permite que um ensaio decorra normalmente. A ausência dos dois leva inevitavelmente à interrupção compulsiva do ensaio.

A existência da PEN permite interromper a ligação com o BL. A interrupção pode ser voluntária, quando a monitorização em tempo real não for necessária, ou por falhas de rede. Em qualquer dos casos os dados guardados na PEN podem ser sincronizados assim que for restabelecida a ligação.

Na arquitetura geral do sistema, previu-se a existência do modo desligado, em que os dados podem ser carregados para o bloco lógico, diretamente a partir da PEN. De qualquer dos modos, os dados têm de ser convertidos para um formato visível, por exemplo *txt*, *csv* ou *xls*. Na interface de utilizador encontram-se as ferramentas de conversão de dados, não se descartando a possibilidade de se poder criar um conversor separado.

Os ensaios a serem executados devem ser programados na interface de utilizador e carregados no controlador. Uma vez carregados os programas poderão ser corridos assim que for recebido o comando de iniciar. Um ensaio em andamento deve ter a possibilidade de ser pausado ou interrompido a qualquer instante. Qualquer comando manual deve ser inibido, designando-se o estado de execução de um ensaio com modo automático.

No modo automático, a execução do ensaio prossegue normalmente desde que tenha um meio de guardar os dados, PEN ou recetor UDP/IP.

O programa é constituído por um conjunto de instruções, no máximo 512 instruções, que são executados sequencialmente. Cada instrução é constituída por 8 bytes, que são uma representação numérica, mas legível das ações a executar. No capítulo seguinte recuperar-se-á este tema identificando-se os códigos numéricos com funções, parâmetros, operadores ou valores.

A tarefa de controlo, quando for comandada para tal, irá interpretar as instruções e executar as ações programadas. Quando todas as instruções foram executadas o sistema sai do modo automático. No caso de existir ligação, passa ao modo manual. No caso de não existir ligação passa ao modo inativo.

5 Desenvolvimento do bloco lógico

O bloco lógico, como referido no capítulo 3, é uma aplicação informática que ir-se-á materializar num qualquer dispositivo computadorizado. A condição necessária para que o SETAS se interligue é a existência de um ponto de acesso à internet.

Na figura 10 esquematizou-se a organização dos grupos funcionais, a IGU, a APD e a IDS.

A IDS é o núcleo deste programa e foi implementado na sua totalidade. A APD foi implementada apenas com a função de conversão de unidades, podendo ser desenvolvida futuramente para acomodar funcionalidades de cálculo avançado. A IGU foi desenvolvida com o estrito cumprimento das premissas de facilidade de instalação, utilização e manutenção.

Na secção seguinte far-se-á uma descrição detalhada dos objetos da IGU, fazendo-se referência sempre que necessário aos blocos da APD e IDS.

5.1 Interface gráfica de utilizador

Na figura 23 encontra-se um instantâneo da interface gráfica de utilizador. O especto geral é o de um painel de instrumentação, que se pretende simples e funcional.

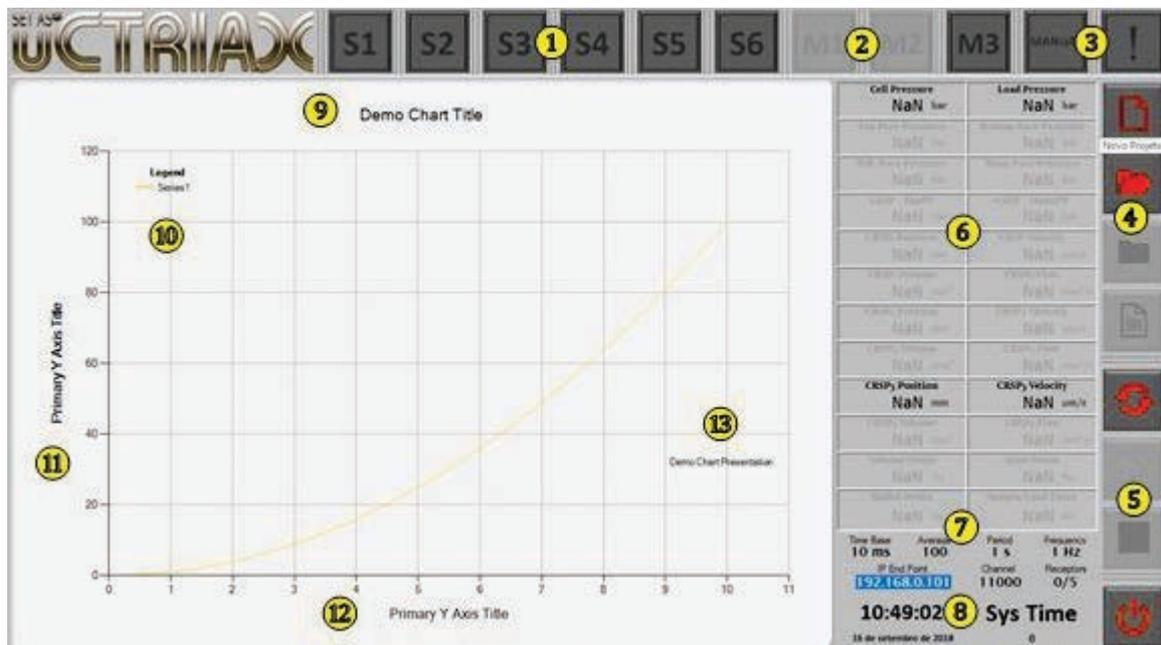


Figura 23: Instantâneo da IGU uCTRIAX.

Em seguida será feita uma descrição de cada um dos objetos gráficos presentes na IGU.

Os objetos identificados com o número 1 são os indicadores de estado das saídas digitais binárias, saídas estas que se identificam como sendo as electroválvulas S1 presentes no diagrama P&ID do BM (Figura 11). Estes objetos têm a dupla funcionalidade de indicadores e comandos. Os comandos apenas estão acessíveis no modo manual, isto é, com ligação estabelecida e sem qualquer ensaio em andamento.

Os objetos identificados com o número 2 são os indicadores dos transdutores CVP1, CVP2 e CVP3. A operação em modo manual destes componentes do sistema segue os mesmos critérios do ponto 1 e far-se-á dentro de uma caixa de diálogo.

Com o número 3 encontram-se os indicadores de estado do sistema, designadamente o estado **Manual, Auto e Desativado**. O estado desativado surge sempre que não exista uma ligação ao BM ou no caso de esta existir quando o sistema tiver detetado uma falha fatal. O indicador de alertas indicará o estado de **Erro**.

O número 4 refere-se a um conjunto de botões que no seu conjunto servem o propósito de criação, importação, fecho de um projeto de ensaio triaxial. A funcionalidade de exportar dados ou relatórios irá surgir quando o ensaio terminar.

O 5 identifica os comandos do ensaio, iniciar, pausar e terminar são as funcionalidades destes dois botões.

O painel identificado pelo 6 é o painel de indicadores de valores instantâneos das variáveis. Os indicadores serão desativados quando as respetivas variáveis não estiverem disponíveis.

O 7 identifica um painel de configuração da aquisição de dados. Repare-se que qualquer os valores do período de dados, do número de amostras e de frequência de dados são comutáveis entre si podendo a configuração ser feita pelo meio que se apresentar o mais adequado.

No painel identificado com o número 8 encontram-se os indicadores de tempo e estado da ligação.

Os objetos identificados pelos números 9 a 13 são os elementos constituintes do gráfico. O 9 é o título do gráfico, o 10 é a legenda da série, o 11 é o título do eixo Y, o 12 o título do eixo do X e o 13 são as anotações facultativas sobre o gráfico. Todos estes elementos contribuem para que os gráficos gerados na IGU sejam dignos de aparecer em um qualquer artigo científico ou técnico.

A Figura 24 mostra um registo de eventos que surge quando se dá um clique de rato sobre o painel de informação do sistema, área que se pode identificar na figura por **Sys Time**.

O propósito deste registo é facilitar a depuração do funcionamento do sistema pois ficam registados todos os eventos. Os eventos são ordenados por ordem cronológica.

Quando ocorre uma falha do sistema, cujo alerta é dado pelo respetivo indicador, o registo de eventos surge automaticamente com a indicação do evento.

Um clique na área de informação do sistema esconde este registo, aparecendo em seu lugar o painel de valores instantâneos identificado com o número 6 da Figura 23.

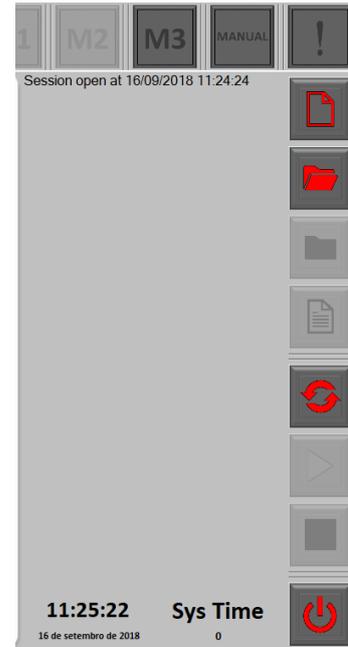


Figura 24: Registo de eventos do sistema.

Na Figura 25 encontra-se um instantâneo da caixa de diálogo de configuração da área de gráficos. Com alguns cliques de rato pode-se configurar até 16 gráficos diferentes. A caixa de diálogo é um objeto imagem da área de gráficos, sendo que tudo o for executado no diálogo se irá manifestar na área de gráficos.



Figura 25: Diálogo de configuração da área de gráficos.

Configurada a área de gráficos, será então necessário configurar as séries a apresentar em cada um dos gráficos, bem como as informações dos títulos e anotações que forem desejadas.

Na Figura 26 aparece um instantâneo da caixa de diálogo de configuração das séries a apresentar no gráfico. As séries são definidas em cada linha e cada um dos seus parâmetros podem ser configurados.

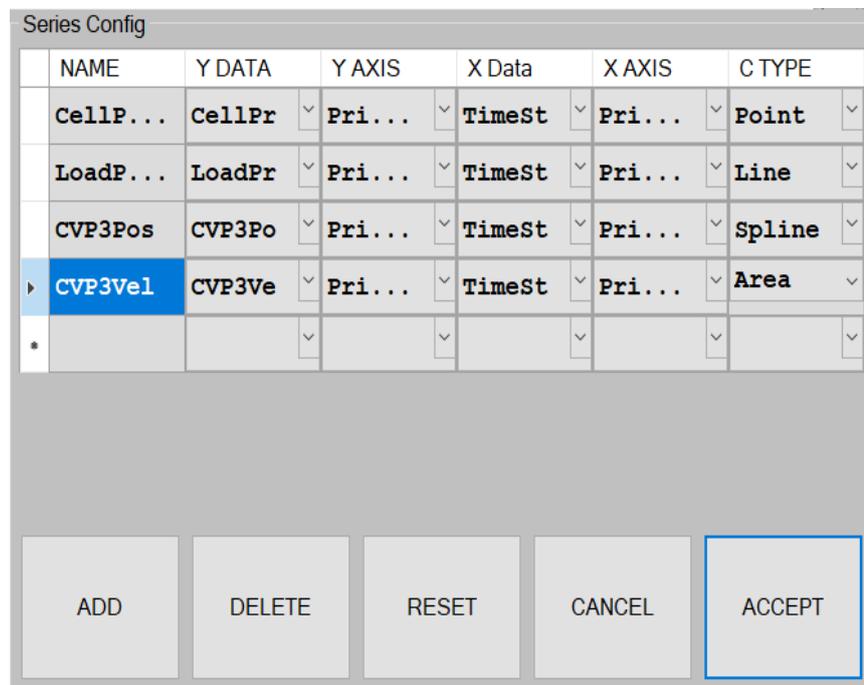


Figura 26: Diálogo de configuração das séries.

A coluna identificada por **NAME**, contem os rótulos de legenda da respetiva serie.

Os dados em X e em Y podem ser seleccionados entre todas as variáveis disponíveis. A posição dos eixos pode ser definida como primárias, à esquerda e em baixo, ou secundárias da direita e em cima.

O tipo de gráficos disponíveis aparece na coluna CTYPE, podendo ser seleccionado o tipo que favoreça a apresentação dos resultados. Alguns exemplos de tipo de gráficos são o Ponto, a Linha, a Linha suavizada e a Área.

Quando se inicia o programa pode-se trabalhar em modo manual desde que se estabeleça a ligação com o BM. Obviamente que este não é o objetivo principal do SETAS. A realização de ensaios é o objetivo principal.

Para a realização de um ensaio é necessário seguir alguns procedimentos de criação de um projeto.

Inicia-se com um clique no botão de criação, identificado no ponto 4 (Figura 23), e surge a caixa de diálogo apresentada na figura 27.

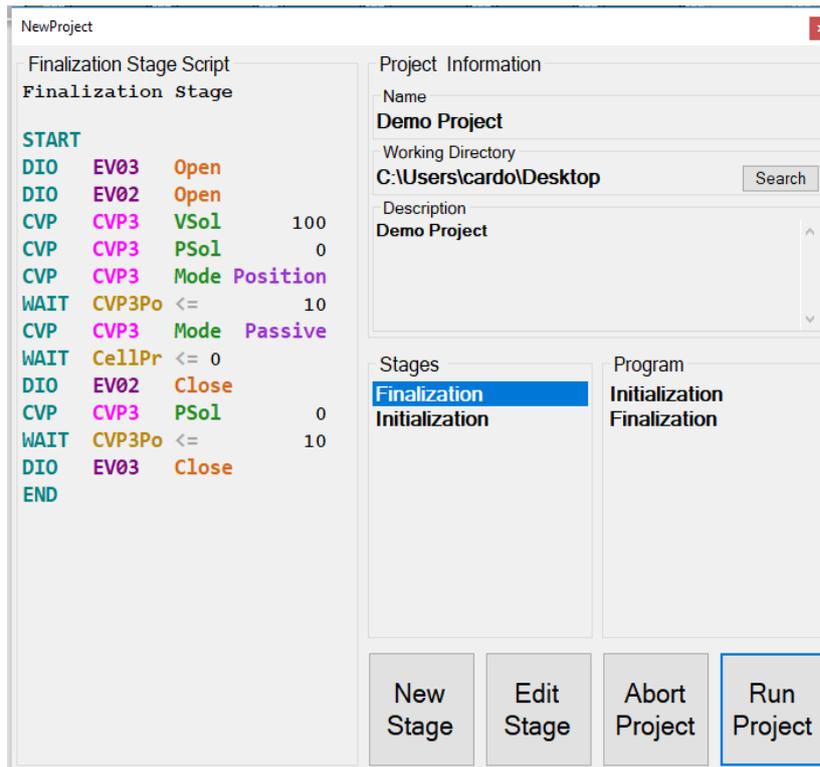


Figura 27: Diálogo de criação de um projeto.

Preenche-se os campos de identificação do projeto, nome, área de trabalho e opcionalmente uma descrição.

Segue-se a criação do programa de ensaios. Um programa de ensaios é composto por uma sequência de fase de ensaio.

As fases de ensaio pré-programadas estão disponíveis na lista de Fases (**Stages**). As fases são inseridas no programa fazendo duplo clique na fase desejada. Inversamente um duplo clique numa fase de ensaio na sequência do programa remove-a do mesmo.

Sempre que uma fase é seleccionada na lista de fases, aparece na lateral esquerda uma pré-visualização das instruções desta fase. A pré-visualização é de leitura apenas, contudo serve o propósito de se poder identificar todas as instruções contidas naquela fase e garantir deste modo que esta é de facto a desejada.

Se existir a necessidade de editar a fase pode-se aceder ao editor de fases clicando no botão **Edit Stage**.

Na Figura 28 está um instantâneo do diálogo de edição de uma fase, neste caso a **Finalization**.

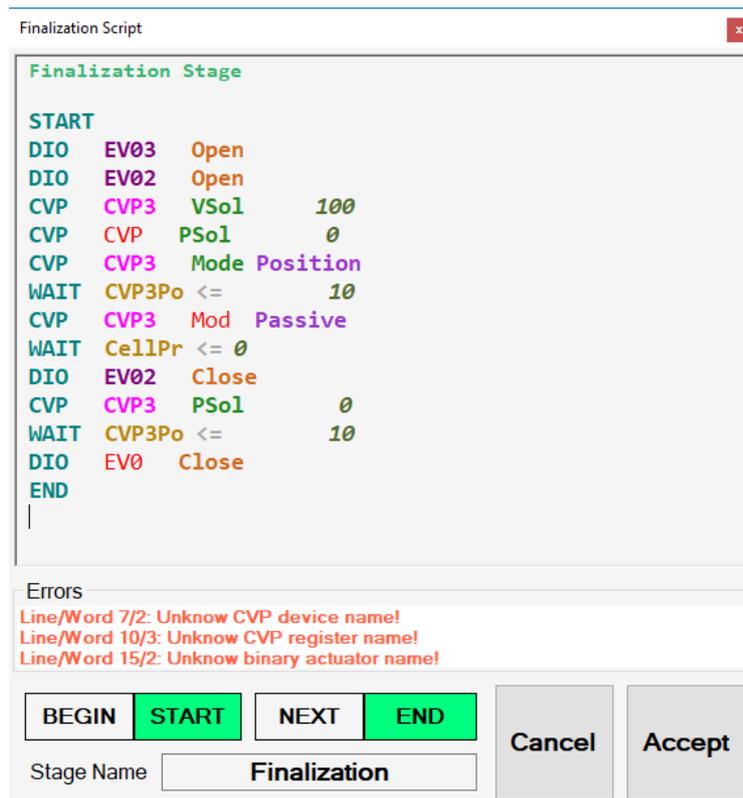


Figura 28: Diálogo de edição de uma fase.

As regras de programação são bastantes simples, um *script* de fase inicia com a palavra chave **Begin** ou **Start** e termina com a palavra chave **Next** ou **End**.

Entre estas duas entradas pode-se programar um número qualquer de instruções, instruções estas que não interessa aqui especificar na totalidade.

Interessa compreender que as instruções estão definidas em linhas, uma instrução por linha, e seguem uma ordem por domínios. As palavras chave **Start** e **End** surgem exatamente no primeiro elemento de cada linha e representam o domínio de integração de fases. Outros domínios surgem nas instruções, cada qual com o seu significado.

Observe-se que a validação das instruções é feita em simultâneo com a escrita e os erros detetados aparecem na área de **Errors**, indicando a palavra causadora através da indicação do número de linha e do número de palavra. Adicionalmente a palavra é formatada com a formatação de erro.

Uma palavra validada é formatada conforme o grupo a que pertence.

Terminada a edição, aceitam-se as alterações clicando no botão **Accept** regressa ao diálogo de criação de projeto.

No caso de se pretender criar uma fase nova, clique no botão **New Stage**, o processo é idêntico com o da edição com a diferença de que neste caso é obrigatório definir um nome para a fase que seja único dentro da lista de fases.

Programado que seja o ensaio, este pode ser carregado no controlador clicando no botão **Run Project**, Figura 27. A criação do projeto pode ser abortada a qualquer momento.

Se existir uma ligação o processo de carregamento far-se-á automaticamente. Se não existir surgirá uma caixa de diálogo onde se poderá seleccionar a opção de criar o projeto desligado com a possibilidade de sincronização no futuro ou repetir a tentativa de estabelecer uma ligação.

Em qualquer dos casos, sucesso ou falha no carregamento do programa no BM, será criado uma pasta de trabalho onde serão guardados os dados do projeto.

Um projeto que tenha sido interrompido poderá ser importado da pasta de trabalho. Para tal basta abrir o ficheiro de informação que se encontra na raiz da pasta de trabalho e que tem o mesmo nome da pasta e extensão **inf**.

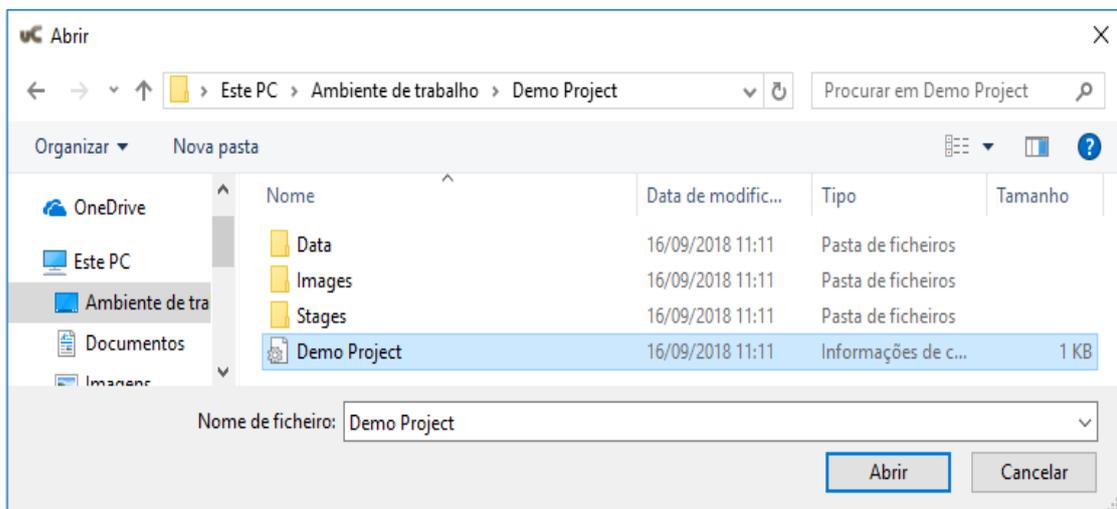


Figura 29: Diálogo de importação de um projeto existente.

Na Figura 29 encontra-se um instantâneo da caixa de diálogo que surge quando se clica no botão de abertura de projeto existente.

As subpastas e o ficheiro de informação foram criados no momento da criação do projeto. Descrição breve, na pasta **Data** serão guardados os dados de ensaio, na **Images** serão guardados os instantâneos tirados aos gráficos e no **Stages** serão guardadas cópias das fases utilizadas no programa de ensaio que servem para referência e portabilidade do próprio projeto.

6 Demonstração experimental

Neste capítulo serão apresentadas algumas experiências para demonstração de conceitos.

A primeira experiência visa determinar se a automatização do enchimento da câmara de ensaios pode ser feita com recurso à monitorização da pressão confinante. O resultado desta experiência será integrado na fase **Inicialização** de qualquer ensaio.

A segunda experiência visa determinar se a automatização do esvaziamento da câmara pode ser feita de igual modo pela monitorização da pressão confinante. O resultado desta experiência será integrado na fase **Finalização** de qualquer ensaio.

A terceira experiência visa determinar a correlação entre a pressão de carga e a força de carga. Se existir uma correlação demonstrada, a célula de carga pode ser substituída com ganhos elevados pelo sensor de pressão de carga.

6.1 Enchimento da câmara de ensaios

Na Figura 30 está representado o circuito de enchimento da câmara de ensaios.

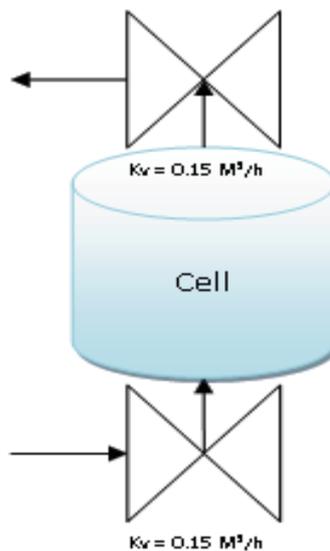


Figura 30: Circuito de enchimento d câmara de ensaios.

As válvulas de admissão, em baixo, e de purga, em cima, estabelecem uma relação entre a câmara totalmente cheia ou não.

No caso de a câmara estar parcialmente cheia, o fluido que passa pela válvula de purga é ar. O ar irá causar uma queda de pressão na válvula de purga que se poderá desprezar.

Supondo uma pressão de entrada de 2bar acima da pressão atmosférica, pressão normal na rede de distribuição de água, haverá uma queda de pressão na válvula de admissão que será praticamente a totalidade da pressão da rede. Neste caso o sensor de pressão confinante irá medir a pressão atmosférica acrescida da pressão hidrostática do fluido acima do nível do sensor.

Uma vez a câmara totalmente preenchida por fluido, passa a existir uma passagem deste mesmo fluido pela válvula de purga. As válvulas de purga e admissão são idênticas, teoricamente a pressão de entrada irá distribuir-se pelas duas válvulas de forma equitativa. O momento em que o enchimento termina é indicado pela alteração brusca da medida de pressão confinante, do valor próximo da pressão atmosférica para um valor aproximadamente metade da pressão de entrada. Note-se que o caudal de fluido diminui para metade quando a câmara encher, este facto permite minimizar as perdas de fluido entre o instante do enchimento e o fecho da válvula de purga.

Na sequência do fecho da válvula de purga a pressão confinante irá alterar novamente de valor, passando a ser uma medida exata da pressão de entrada visto o movimento de fluido ter terminado. No momento do fecho da válvula de purga a pressão confinante irá apresentar um transitório oscilante amortecido que irá estabilizar passado um curto



Figura 31: Gráfico da evolução de P_{Cell} durante o processo de enchimento da câmara

intervalo de tempo. Uma vez a pressão confinante estabilizada pode-se fechar a válvula de admissão em segurança, permanecendo a câmara completamente preenchida de fluido à pressão de entrada.

A Figura 31 apresenta o gráfico dos resultados experimentais da evolução da pressão confinante durante o processo de enchimento.

As previsões teóricas verificam-se quase na totalidade, uma subida ligeira de P_{Cell} enquanto a câmara estava parcialmente cheia de água, a transição para um patamar intermédio quando a fica totalmente preenchida, zona 1, e a observação do transitório após o fecho da válvula de purga, zona 2.

O nível do patamar que indica o estado de câmara cheia é inferior ao esperado, o que se deve ao efeito de obstáculos na tubagem entre a válvula de admissão e a câmara de ensaios e que ignorados na análise teórica.

A existência de um abaixamento rápido da pressão de patamar deve-se à existência de uma bolha de ar no interior da câmara mesmo após a válvula de purga começar a ser atravessada por água. Esta bolha de ar foi manualmente conduzida ao orifício de purga e a sua saída causou o abaixamento momentâneo de P_{Cell} .

A observação da existência da bolha de ar levou à análise da geometria da tampa superior da câmara e à verificação que a mesma é plana horizontal na face inferior, permitindo deste modo a permanência de ar no interior da câmara. Para se evitar que que repita este acontecimento deve-se maquinar a referida face da tampa com uma geometria que facilite o encaminhamento do ar para o orifício de purga, orifício que deverá estar localizado no ponto de maior cota do interior da câmara de ensaios.

Os resultados experimentais indicam claramente que se pode automatizar o enchimento recorrendo a P_{Cell} como variável de controlo.

1.1 Esvaziamento da câmara de ensaio

Na Figura 32 representa-se o circuito de descarga da câmara de ensaios.

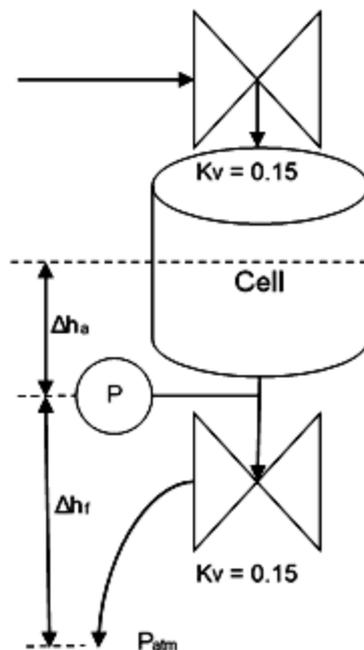


Figura 32: Circuito de esvaziamento da câmara de ensaios.

Neste caso as válvulas em funcionamento são a de purga e a de descarga da câmara.

A descarga será feita por ação da força de gravidade.

O processo de deteção e controlo do esvaziamento assenta na perceção da mudança da referência no caso de a válvula de purga estar aberta ou fechada.

No caso de estar aberta a referência à pressão atmosférica é feita ao nível do fluido no interior da câmara.

No caso de a válvula de purga estar fechada a referência passa a ser no limite inferior da tubagem de descarga.

Durante uma comutação da válvula de purga a pressão do ar no interior da câmara irá variar entre a pressão atmosférica, válvula aberta, a pressão atmosférica subtraída do fator de desnível, $\rho g(\Delta h_a + \Delta h_f)$. Fixada a quantidade de matéria, a pressão de ar é inversamente proporcional ao volume de ar no interior da câmara.

Os valores medidos pelo sensor de pressão confiante, que se admite estar na localização indicada na Figura 32, vão variando de amplitude conforme o nível de fluido desce no interior da câmara. Por si só, esta amplitude pode dar uma indicação da altura a que o nível de fluido está relativamente à posição do sensor. Não se pretende aqui explorar esta

abordagem, mas sim identificar o ponto em que se possa considerar que a câmara está vazia.

Verifica-se que se aplicarmos uma comutação periódica à válvula de purga irá surgir um sinal periódico amortecido na pressão confinante. Quando a câmara estiver totalmente vazia a comutação da válvula deixa de ter qualquer efeito sobre o valor de P_{Cell} visto todo o circuito de descarga estar preenchido por ar e, portanto, a medida estabilizar na pressão atmosférica.

Na Figura 33 está representado o gráfico dos valores experimentais de P_{Cell} durante o processo de esvaziamento da câmara.



Figura 33: Evolução de P_{Cell} durante o processo de esvaziamento da câmara

No gráfico identificando-se o decréscimo suave da pressão que reflete a diminuição da altura do nível de fluido durante a descarga e que irá estabilizar no valor da pressão atmosférica quando o circuito de descarga se encontrar completamente vazio.

Sobreposta à descida anteriormente mencionada, verifica-se três picos negativos que correspondem ao intervalo de tempo entre o fecho e a abertura da válvula de purga em três instantes diferentes. A rapidez com que a pressão diminui é inversamente proporcional à variação do volume de ar no interior da câmara. Sabendo-se como varia o caudal de descarga pode-se determinar o volume de ar no interior da câmara a partir da pressão do fluido. Não sendo um objetivo a determinação deste volume, é interessante notar que se pode obter uma medida baseada neste processo.

As previsões teóricas de sinal periódico amortecido como resposta a uma comutação periódica da válvula de purga confirmam-se experimentalmente. A amplitude da variação de pressão para um determinado período, ou de modo análogo o intervalo de tempo que demora a atingir uma determinada variação de pressão são bons indicadores do nível de líquido no interior da câmara.

A condição de câmara vazia pode ser detetada quando a pressão confinante se tornar indiferente à comutação da válvula de purga.

A experiência provou ser detetável a câmara vazia com recurso à pressão confinante. Por uma questão de segurança, depois de a pressão confinante se tornar indiferente à comutação da válvula de purga deve-se aguardar um pequeno intervalo de tempo antes de fechar a válvula de descarga e na sequência a válvula de purga, com ou sem atraso.

Uma outra conclusão que se pode tirar da análise gráfica dos resultados experimentais é que a descarga está a demorar demasiado tempo, pelo que se deve trocar a válvula de descarga por uma de K_v (coeficiente de orifício, definido como sendo o caudal de fluido que gera uma perda de carga de 1bar na passagem pela válvula) superior.

1.2 Correlação entre Pressão de carga e Força de carga

Uma das problemáticas do sistema antecessor a este é o processo de medida da tensão axial sobre a amostra. Nele, a medida é feita com recurso a uma célula de carga instalada no interior da câmara de ensaios. Esta localização implica uma construção especializada do elemento sensor para suportar as condições em que irá funcionar o que naturalmente o torna de custo elevado. Outro facto que se deve ter em consideração é o da necessidade de um mecanismo de passagem do cabo para o exterior da câmara. A instalação do sensor na tampa superior da câmara, tampa esta que é amovível torna-o muito exposta a choques mecânicos que o danifiquem ou a guilhotinamentos do cabo.

Pelas razões apresentadas anteriormente ir-se-á determinar a correlação entre a pressão de carga e a força de carga, que na teoria são perfeitamente correlacionadas, numa tentativa de se desenvolver um processo de medida da força de carga ou tensão vertical sobre a amostra, as duas são representações equivalentes, com recurso a sensores simples e robustos, instalados em zonas seguras. Este sensor supõe-se aqui que seja o sensor de pressão do fluido de carga.

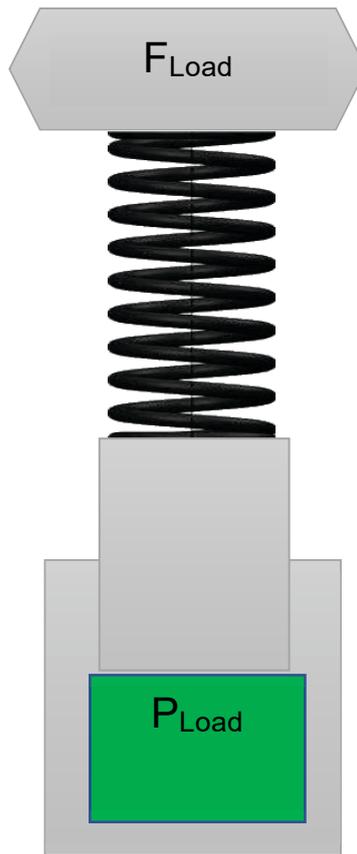


Figura 34: Montagem experimental de correlação entre F_{Load} e P_{Load} .

Na Figura 34 encontra-se esquematizado a montagem experimental para determinação da correlação efetiva entre a força de carga e a pressão do fluido de carga. A mola tem as dimensões 76mm de altura e 35mm de diâmetro, o que é praticamente as dimensões da amostra, e uma constante elástica de 200N/mm.

A força e a pressão de carga não foram amostradas em simultâneo para deste modo garantir uma compatibilidade temporal, contudo admite-se que o erro seja desprezável dada a lentidão dos processos envolvidos.

A uma taxa de aquisição de uma amostra por segundo e uma taxa de variação da força de carga de 10N/min permitiu executar a experiência de compressão seguida de descompressão, -10N/min, num intervalo de aproximadamente 5 horas.

Os dados obtidos foram representados num gráfico F_{Load} versus P_{Load} para cada uma das situações de variação monótona.

Na Figura 35 apresenta-se o resultado do ajuste linear à curva obtida na compressão. A força tem unidades N e a pressão kPa. O ajuste foi executado no programa Matlab.

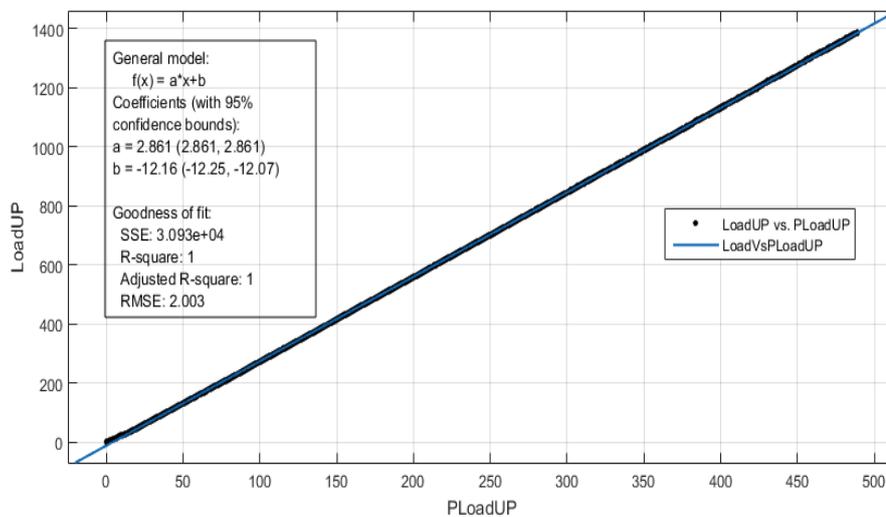


Figura 35: Correlação entre a F_{load} e P_{load} , durante a compressão da mola

Verifica-se que o ajuste linear é excelente, $R^2 = 1$.

Até este momento a indicação que se obteve é de que se pode tomar a pressão de carga como medida indireta da força de carga pois as duas estão correlacionadas por uma relação linear perfeita.

Na Figura 36 apresenta-se o resultado do ajuste para a descompressão. Do mesmo modo que na Figura 35, a força tem unidades N e a pressão kPa.

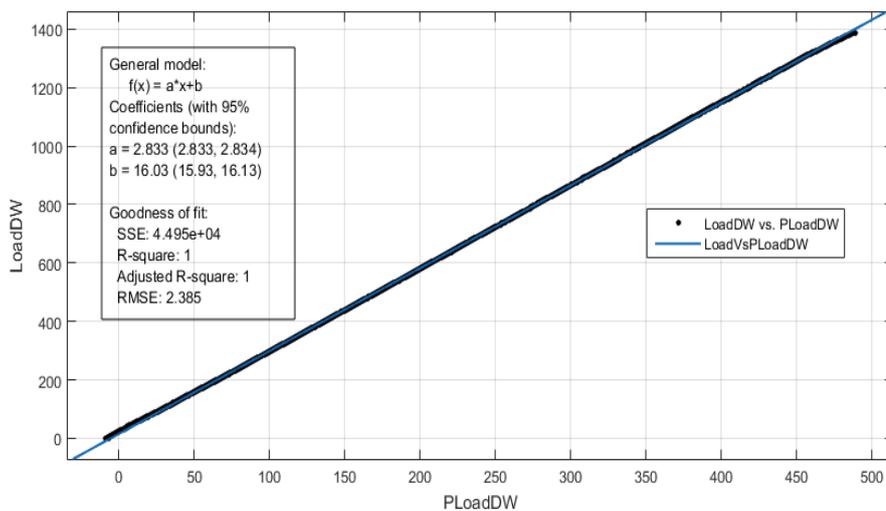


Figura 36: Correlação entre a F_{load} e P_{load} , durante a descompressão da mola

Aparentemente o resultado obtido na descompressão repete-se, sendo o ajuste da correlação uma reta perfeita.

Uma análise cuidada dos coeficientes da reta de ajuste, mostra que existe um desvio no zero e que este é negativo na compressão e positivo na descompressão.

Uma outra diferença detetada é que o valor da constante de proporcionalidade, coeficiente **a**, difere nos dois casos. Observando-se que a força e a pressão que a exerce numa determinada área são por definição proporcionais e a constante de proporcionalidade é a área, **$F = A \cdot P$** .

Como a constante de proporcionalidade é diferente nos dois casos depreende-se que o mecanismo de carga se comporta como tendo duas áreas efetivas distintas, uma na compressão e outra na descompressão. Como a constante de proporcionalidade é superior na compressão, **$a = 2,861$** , que na descompressão, **$a = 2,833$** , conclui-se que o mecanismo de carga se comporta como tendo uma área efetiva maior que na compressão.

Não obstante serem diferentes as retas de correlação admite-se com um elevado grau de confiança ser possível criar o processo alternativo de medida da força de carga recorrendo à medida da pressão de carga.

Os dois processos de medida serão implementados no SETAS para se continuar o estudo desta correlação e provavelmente se desenvolver um processo de medida da força de carga baseado no valor da pressão de carga com resultados equivalentes. Neste caso a célula de carga pode ser eliminada do sistema.

7 Síntese e conclusão

Os componentes materiais foram desenvolvidos, fabricados e montados nas respetivas caixas e encontram-se prontos para instalação no laboratório.

O firmware da interface analógica/digital não foi desenvolvido devido ao elevado volume de trabalho.

A demonstração experimental permite aceitar com um elevado grau de confiança que a medida da força de carga axial pode ser feita recorrendo à pressão de fluido de carga, pelo que serão mantidos os dois processos de medida no sistema para continuação do estudo.

A demonstração experimental do processo de enchimento e esvaziamento da câmara permite criar um modelo de controlo automático baseado nestes dois processos.

A simplicidade e a funcionalidade da interface de utilizador irão permitir no futuro programar e executar ensaios triaxiais com o mínimo de intervenção humana, poupar energia desligando a interface de utilizador durante o longo período de ensaio, apoiar a manutenção com autodiagnósticos e algoritmos de manutenção preditiva, produzir gráficos autenticados e de qualidade compatível com qualquer artigo científico ou técnico e eventualmente no futuro a geração automática de relatórios de ensaio.

No geral, os objetivos foram atingidos.

No futuro próximo deverá ser desenvolvido o firmware da IAD, proceder-se à calibração de cada canal para um sensor analógico exclusivo.

A instalação no laboratório dos componentes já desenvolvidos irá permitir avaliar o seu desempenho e extrair informação necessária à otimização dos componentes em falta.

A otimização dos componentes em falta e o seu fabrico irá permitir a médio prazo a colocação do sistema em funcionamento.

8 Referências Bibliográficas

- Barr, M. (1999). *Programming Embedded Systems in C and C++*. O'Reilly.
- Ben-Ari, M. (2006). *Principles of Concurrent and Distributed Programming, Second Edition*. London: Addison-Wesley.
- Committee, M. S. (2008). *IEEE Std 754 - 2008*. New York: IEEE.
- Coulouris, G., & Kindberg, T. (2011). *Distributed Systems – Concepts and Design, 5th Edition*. Addison - Wesley.
- Head, K. H., & Epps, R. J. (2014). *Manual of Soil Laboratory Testing: Volume III: Effective Stress Tests, Third Edition*. Dunbeath Mill, Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing.
- Jamro, M. (2018). *C# Data Structures and Algorithms*. Birmingham: Packt Publishing Ltd.
- Lade, P. V. (2016). *Triaxial Testing of Soils*. Oxford: John Wiley & Sons, Ltd.
- Lammermann, S. (2008). *Ethernet as a Real-Time*. Leipzig: University of Telecommunications.
- McAviney, T., & Mulley, R. (2004). *Control System Documentation: Applying Symbols and Identification, 2nd Edition*. USA: ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- Modbus.org. (2006). *MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.02*.
- SAMSON AG. (2016). *Terminology and Symbols in Control Engineering*. Frankfurt: SAMSON AG.
- Texas Instruments. (julho de 2013). *MSP430x2xx Family Users Guide*. Obtido de [www.ti.com: http://www.ti.com/lit/ug/slau144j/slau144j.pdf](http://www.ti.com/lit/ug/slau144j/slau144j.pdf)
- Texas Instruments. (18 de junho de 2014). *Tiva C Series TM4C1294NCPDT Microcontroller Data Sheet datasheet (Rev. B)*. Obtido de [www.ti.com: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tm4c1294ncpdt.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tm4c1294ncpdt.pdf)

Texas Instruments. (2016). *TI-RTOS 2.16 for TivaC Getting Started Guide*. Texas Instruments.

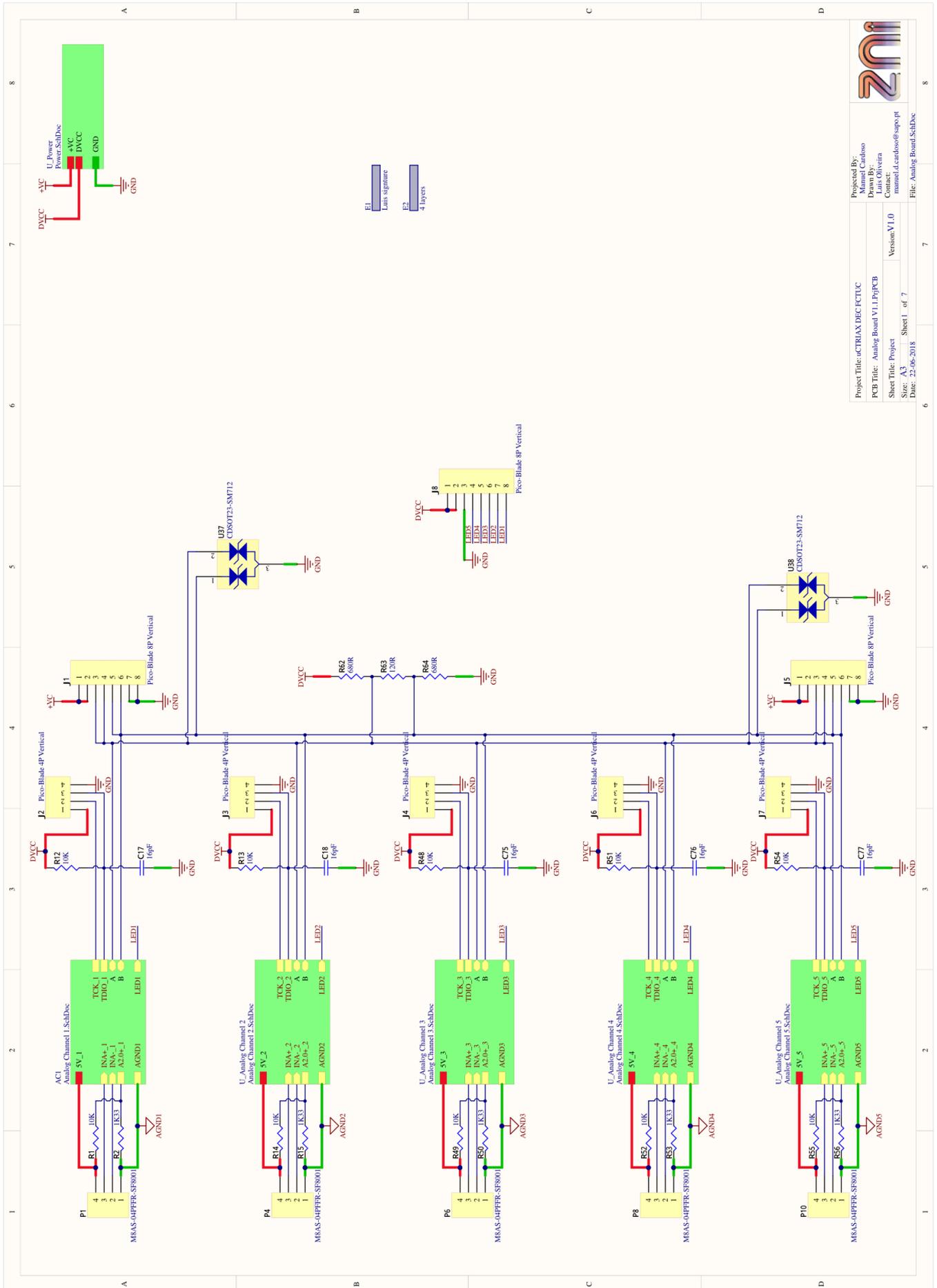
Texas Instruments. (junho de 2018). *MSP430AFE2x3, MSP430AFE2x2, MSP430AFE2x1, Mixed-Signal Microcontrollers*. Obtido de www.ti.com: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430afe253.pdf>

Texas Instruments. (fevereiro de 2018). *TI-RTOS Kernel (SYS/BIOS) User's Guide*. Obtido de <http://www.ti.com>: <http://www.ti.com/lit/ug/spruex3u/spruex3u.pdf>

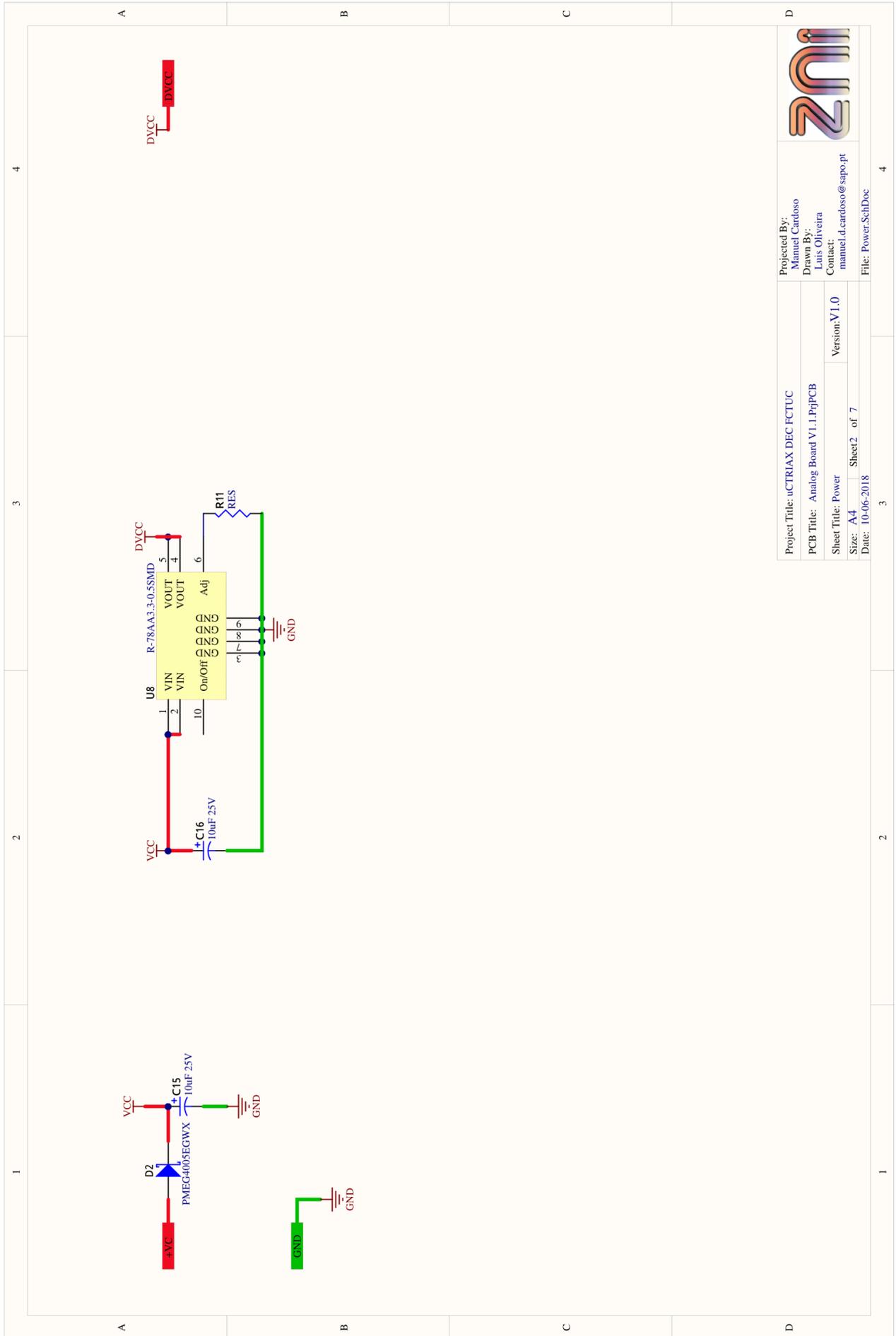
9 Anexos

9.1 Esquema eletrónico da Interface Analógica/Digital

Nas páginas seguintes encontra-se anexado o esquema eletrónico da interface analógica/digital.

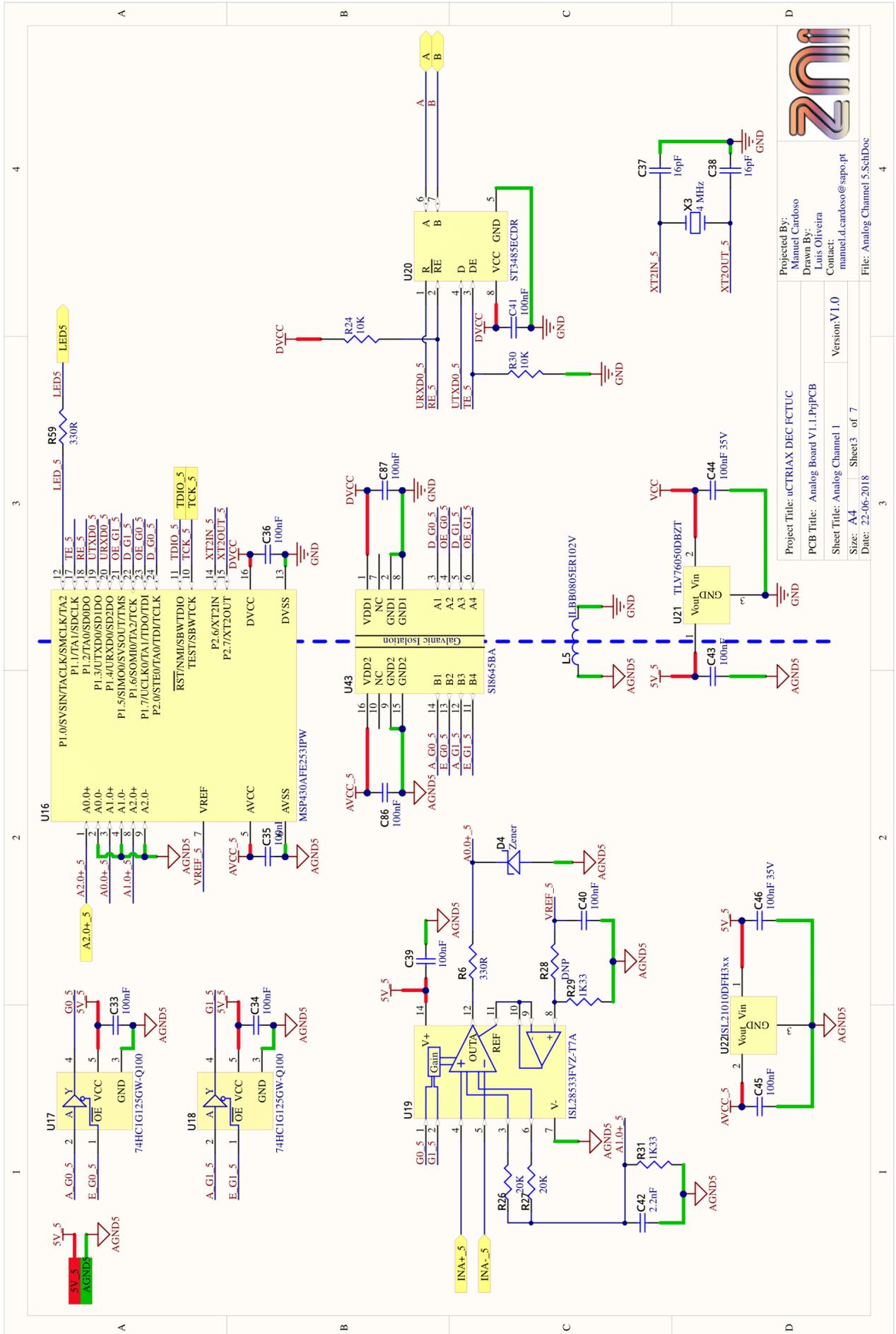



 Project Title: CTRIAx DEC FCTUC
 PCB Title: Analog Board V.1.1.Pcb
 Sheet Title: Project
 Size: A3
 Date: 22-06-2018
 Sheet 1 of 7
 Version: V1.0
 Projected By: Manuel Cardoso
 Designed By: Manuel Cardoso
 Layout By: Lúcia Oliveira
 Contact: manuel.l.cardoso@sapo.pt
 File: Analog_Board_Sch.Dwg

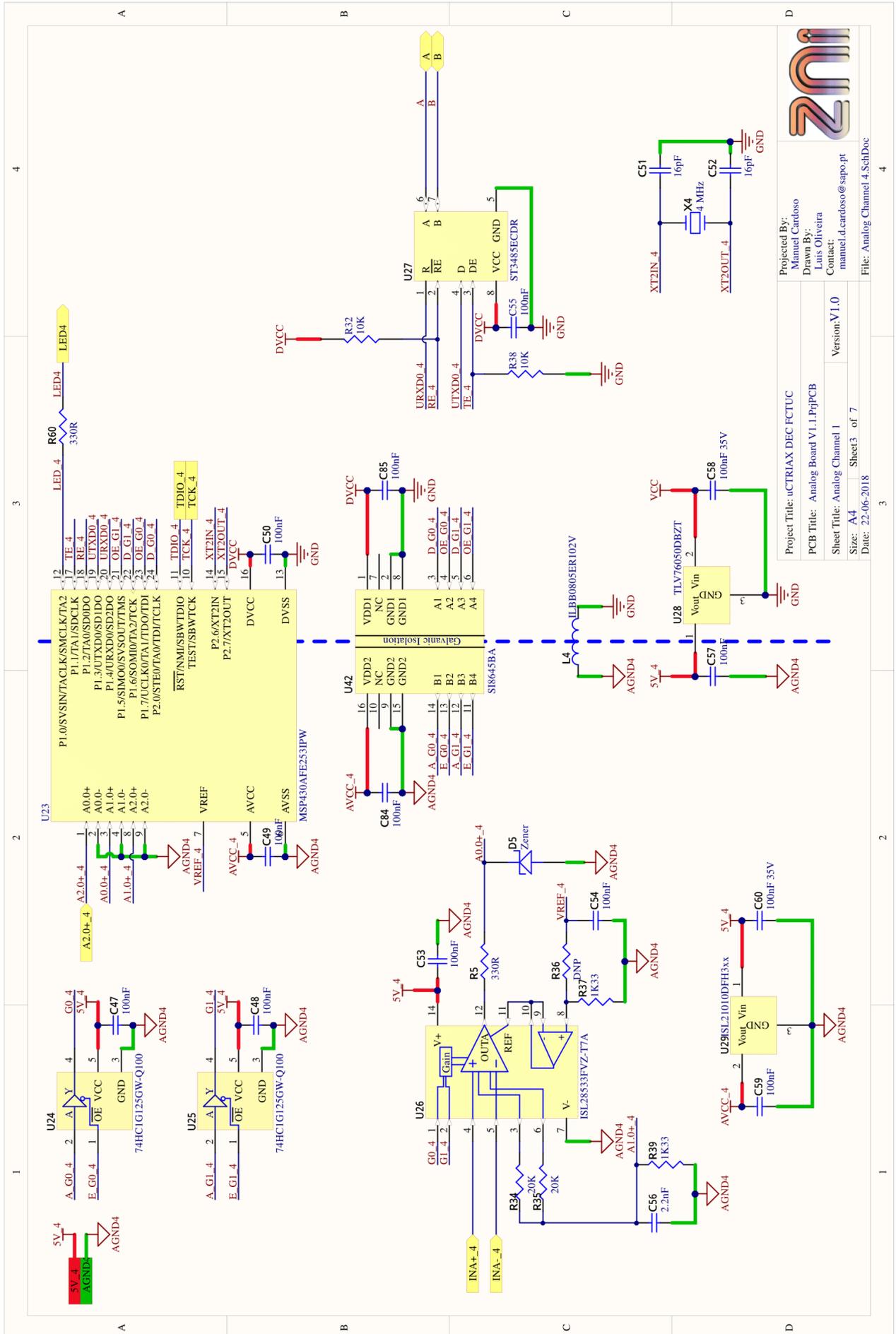


Project Title: uCTRIAX DECFCTUC	Projected By: Manuel Cardoso
PCB Title: Analog Board V.1.1.PrfPCB	Drawn By: Luis Oliveira
Sheet Title: Power	Contact: manuel.d.cardoso@sapo.pt
Version: V1.0	
Size: A4	Sheet 2 of 7
Date: 10-06-2018	File: Power.SchDoc

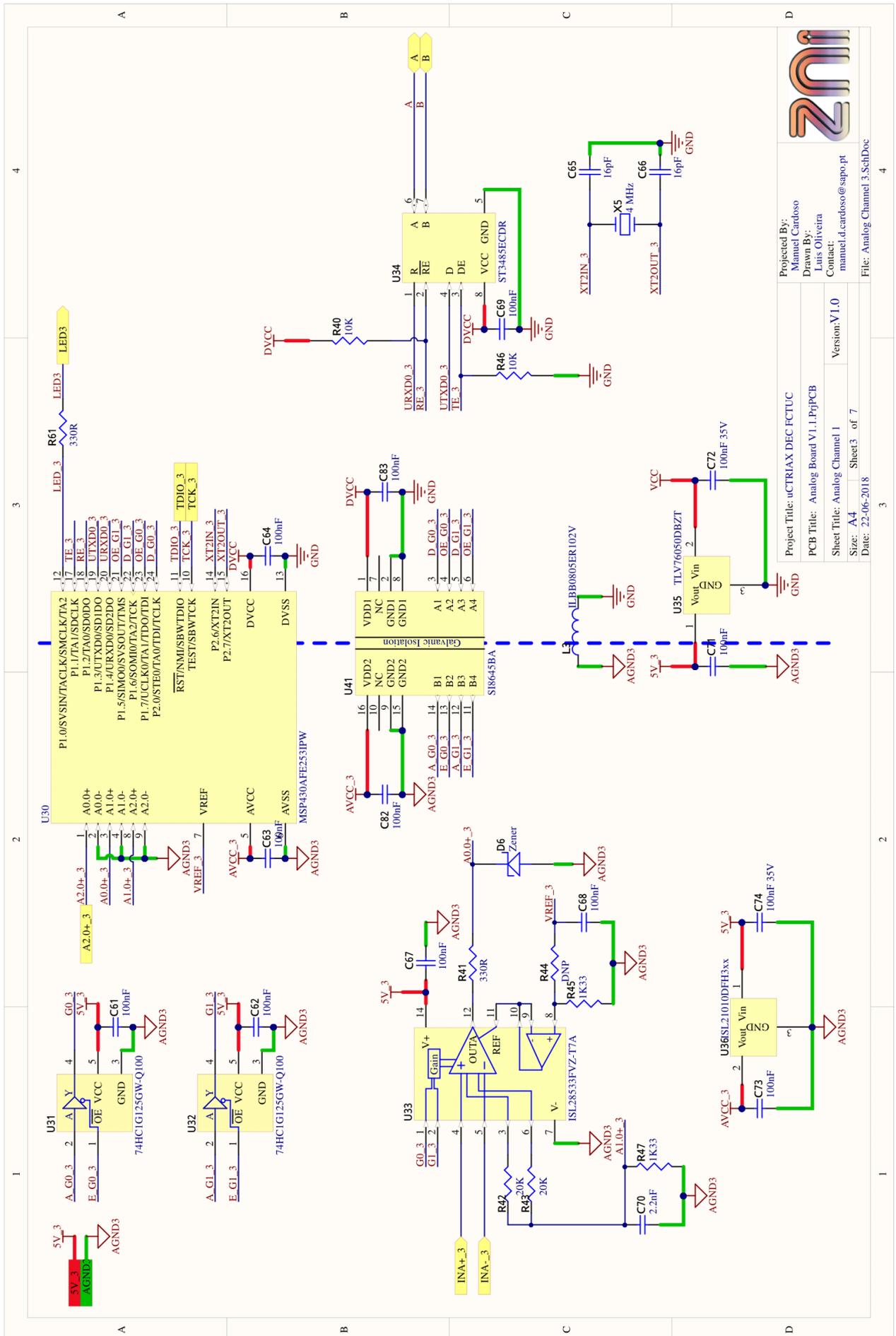




ZMI	
Project Title: uCTRIAX DECTUC	Projected By: Mameel Cardoso
PCB Title: Analog Board V1.1.PrfPCB	Drawn By: Luis Oliveira
Sheet Title: Analog Channel 1	Contact: mameel.d.cardoso@sapo.pt
Version: V1.0	
Size: A4	Sheet 3 of 7
Date: 22-06-2018	File: Analog Channel 5.SchDoc

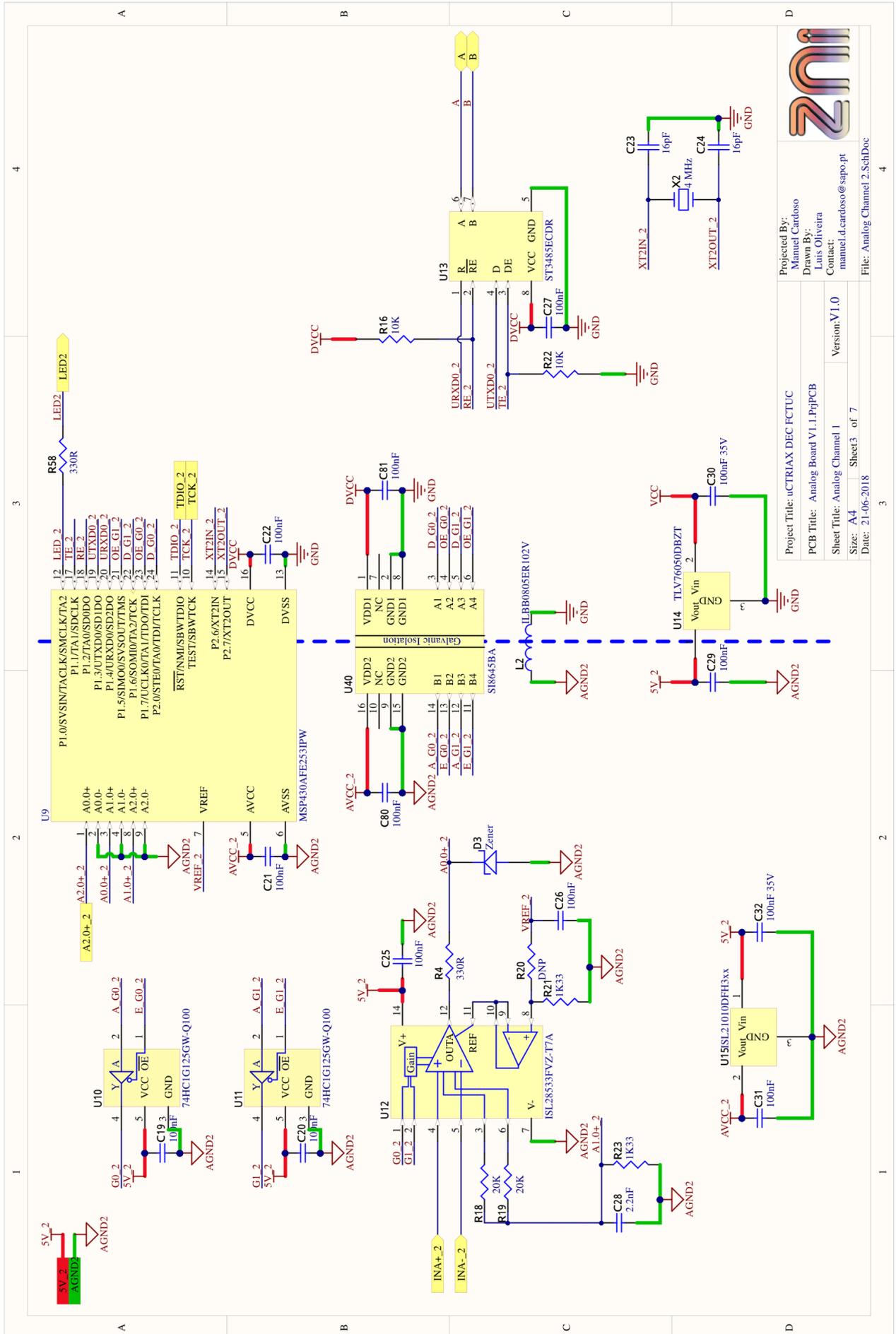


		Project Title: uCTRIAX DECFCTUC
		PCB Title: Analog Board V1.1.PrfPCB
Version: V1.0	Sheet Title: Analog Channel 1	Size: A4
Projected By: Mameel Cardoso	Drawn By: Luis Oliveira	Date: 22-06-2018
Contact: mameel.d.cardoso@sapo.pt	File: Analog Channel 4.SchDoc	Sheet 3 of 7



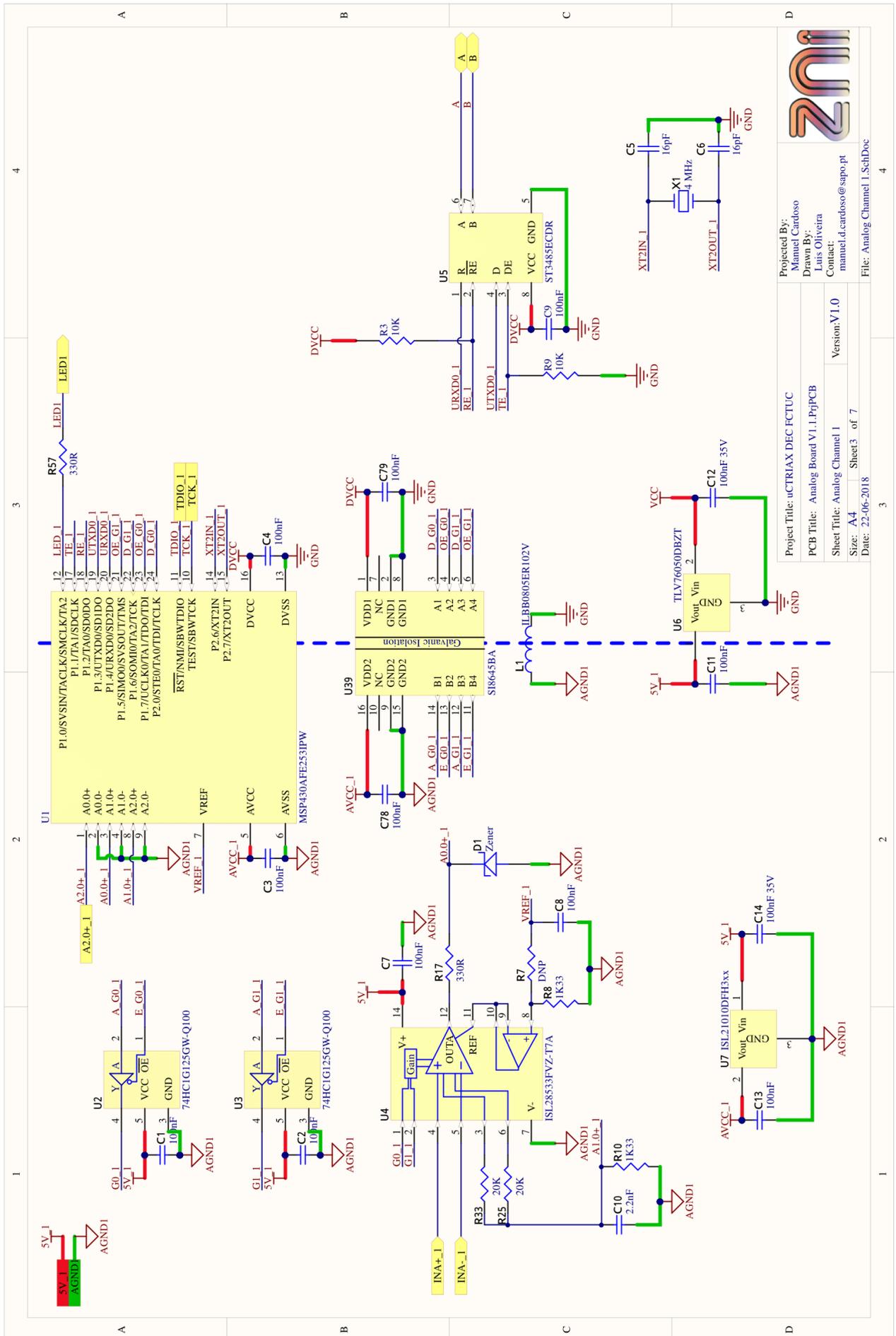
Project Title: uCTRIAX DECFCTUC	Projected By: Mannel Cardoso
PCB Title: Analog Board V1.1.PrfPCB	Drawn By: Luis Oliveira
Sheet Title: Analog Channel 1	Contact: mannel.d.cardoso@sapo.pt
Version: V1.0	
Size: A4	File: Analog Channel 3.SchDoc
Sheet 3 of 7	
Date: 22-06-2018	





Projected By: Mameel Cardoso
 Drawn By: Luis Oliveira
 Contact: mameel.d.cardoso@sapo.pt
 File: Analog Channel 2.SchDoc

Project Title: uCTRIAX DECFCTUC
 PCB Title: Analog Board V1.1.PrfPCB
 Sheet Title: Analog Channel 1
 Version: V1.0
 Size: A4
 Sheet 3 of 7
 Date: 21-06-2018



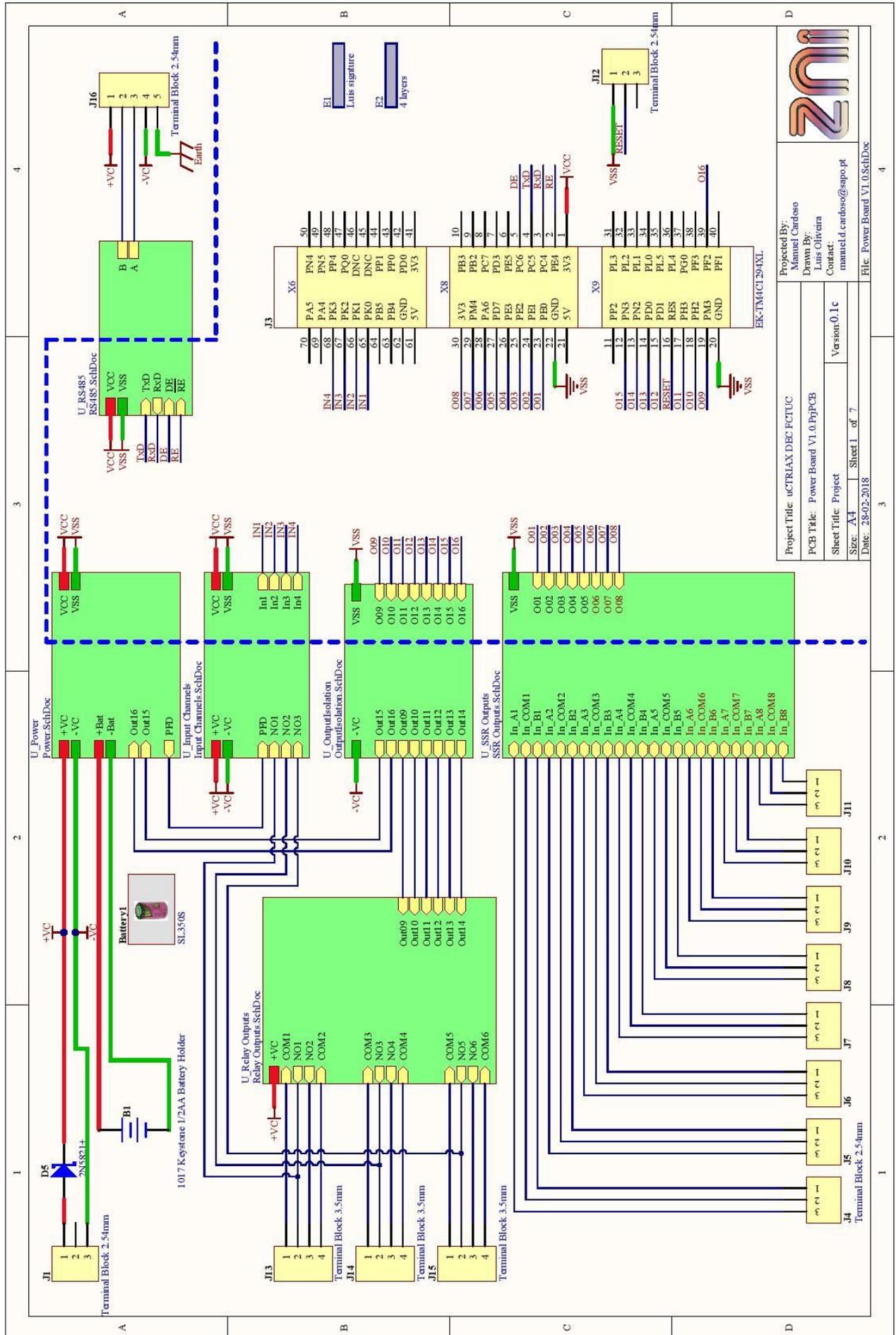
Project Title: uCTRIAX DECFCTUC	Projected By: Mameel Cardoso
PCB Title: Analog Board V1.1.PrfPCB	Drawn By: Luis Oliveira
Sheet Title: Analog Channel 1	Contact: mameel.d.cardoso@sapo.pt
Version: V1.0	
Size: A4	Sheet 3 of 7
Date: 22-06-2018	File: Analog Channel 1.SchDoc



9.2 Esquema eletrónico da Interface de Isolamento

Em seguida será anexado o esquema eletrónico da interface de isolamento.

.



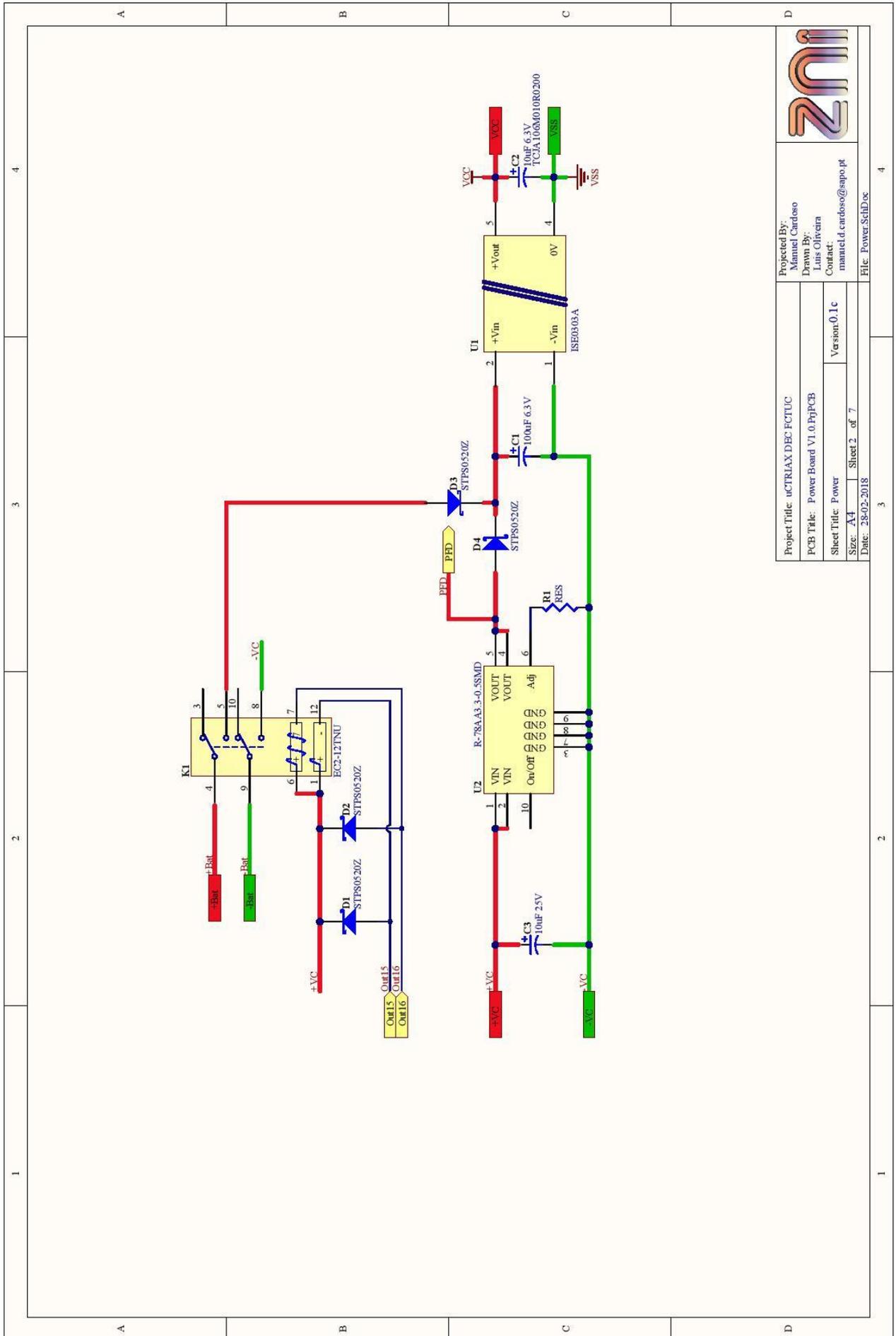
zmi

Project Title: uCTRIAX.DEG.FCTUC
 PCB Title: Power Board V1.0.PrjPCB
 Sheet Title: Project
 Size: A4 | Sheet 1 of 7
 Date: 28/02/2018

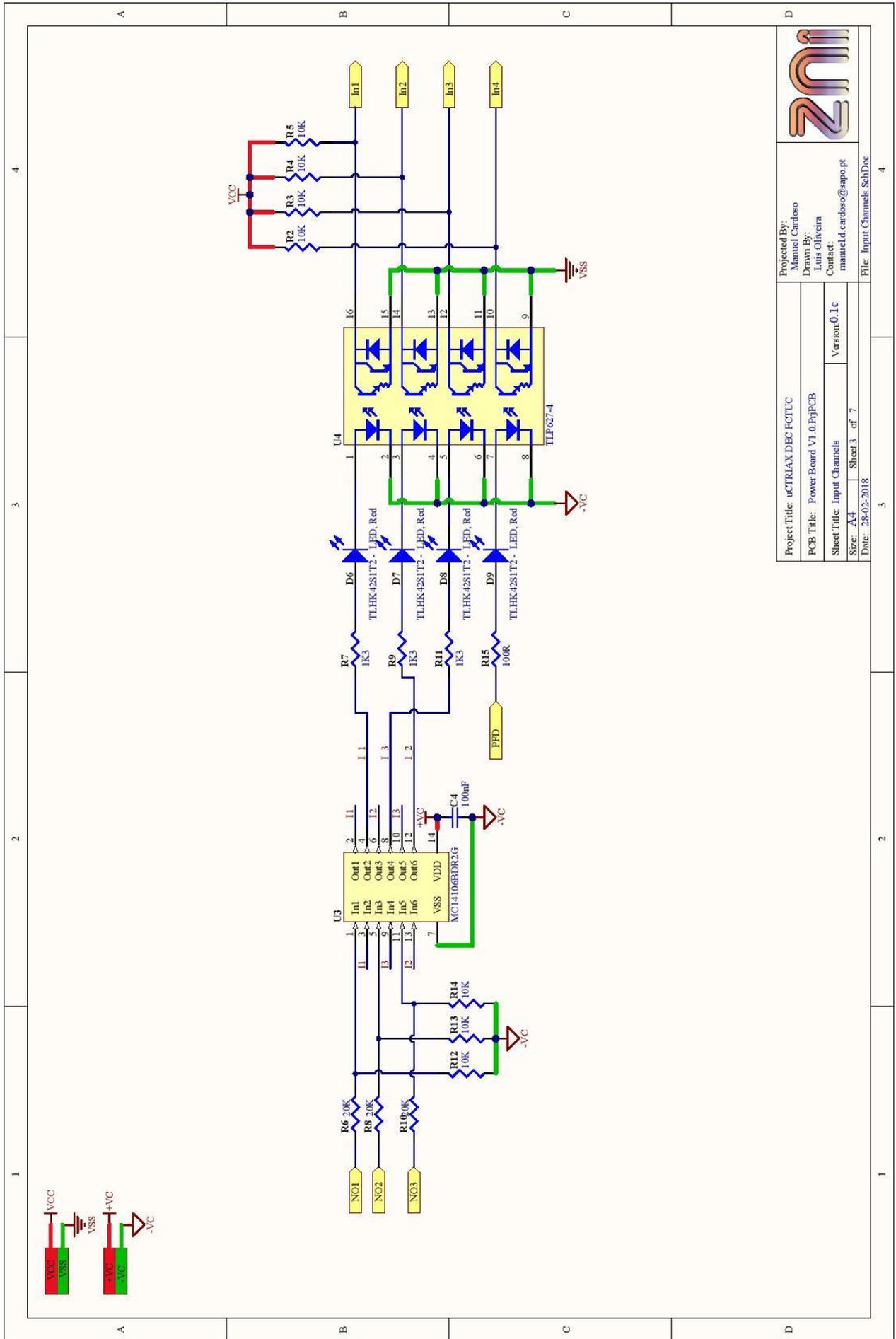
Projected By: Manuel Cardoso
 Drawn By: Luis Oliveira
 Contact: manuel.d.cardoso@sapo.pt

Version: 0.1c

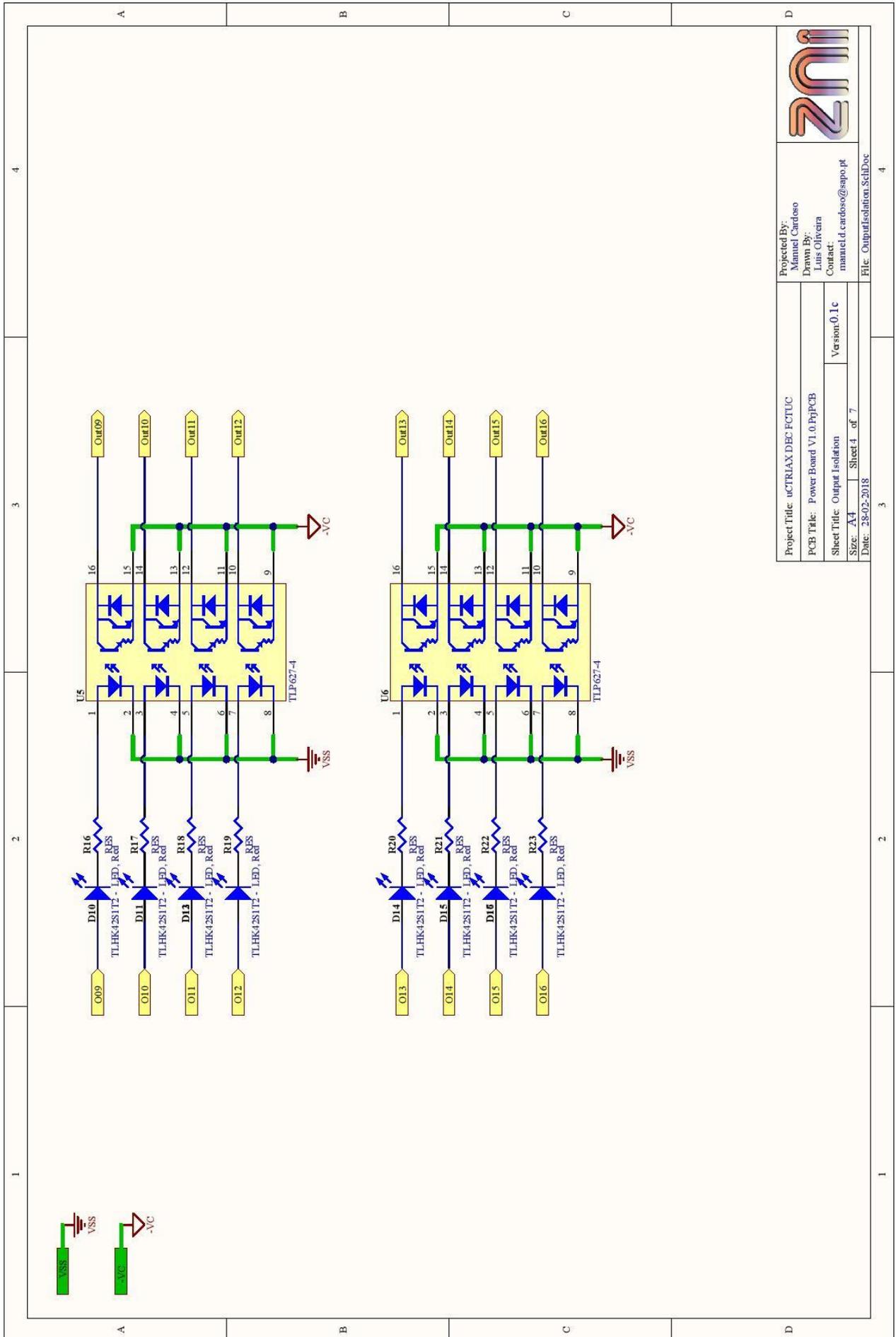
File: Power Board V1.0.SchDoc



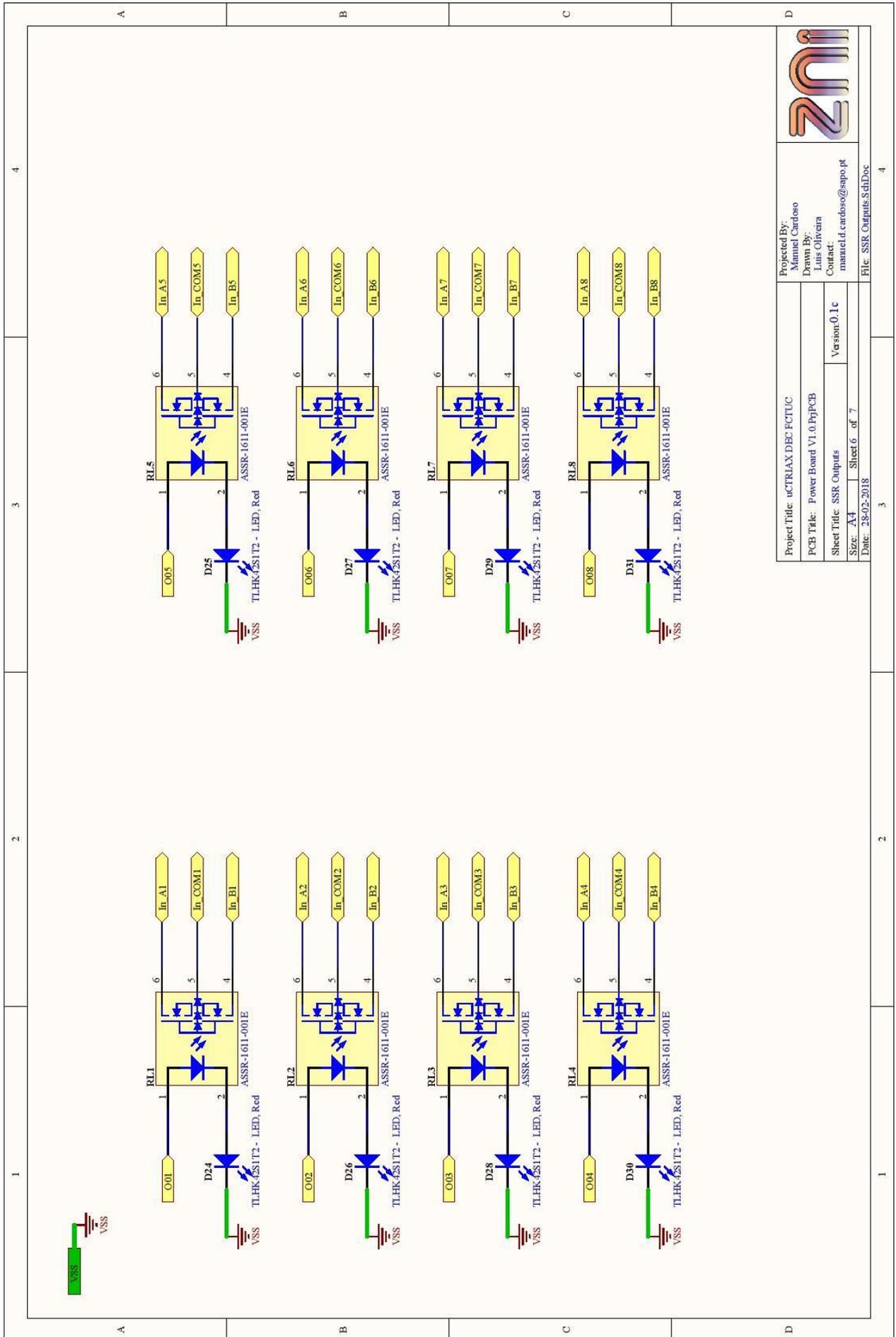
	
Project Title: uCTRIAX.DEG.FCTUC	Projected By: Manuel Cardoso
PCB Title: Power Board V1.0.PrjPCB	Drawn By: Luis Oliveira
Sheet Title: Power	Contact: manuel.d.cardoso@sapo.pt
Size: A4	Version: 0.1c
Date: 28-02-2018	File: Power.SchDoc



	
Projected By: Manuel Cardoso	Project Title: uCTRIAX.DEC.FCTUC
Drawn By: Luis Oliveira	PCB Title: Power Board V1.0.PrjPCB
Contact: manuel.d.cardoso@sapo.pt	Sheet Title: Input Channels
File: Input Channels_SchDoc	Version: 0.1c
Date: 28-02-2018	Size: A4 Sheet 3 of 7

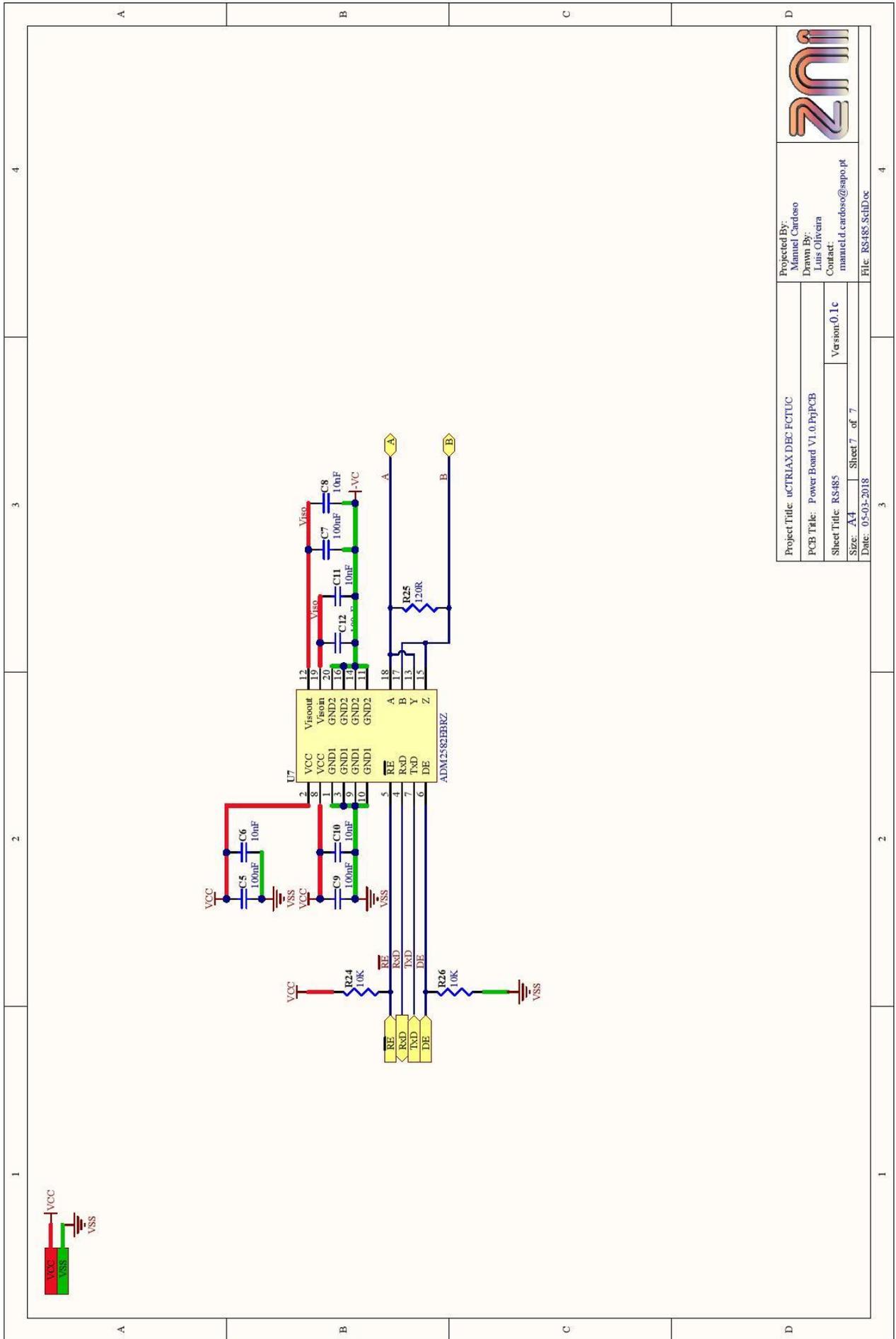


	
Projected By: Manuel Cardoso	Project Title: uCTRIAX.DEC.FCTUC
Drawn By: Luis Oliveira	PCB Title: Power Board V1.0.PnpPCB
Contact: manuel.d.cardoso@sapo.pt	Sheet Title: Output Isolation
File: OutputIsolation.SchDoc	Version: 0.1c
Date: 28-02-2018	Size: A4 Sheet 4 of 7



Projected By: Manuel Cardoso Drawn By: Luis Oliveira Contact: manuel.d.cardoso@sapo.pt File: SSR Outputs.SchDoc	
Project Title: uCTRIAX.DEC.FCTUC	
PCB Title: Power Board V1.0.PrjPCB	
Sheet Title: SSR Outputs	
Size: A4	Sheet 6 of 7
Date: 28-02-2018	





	
Projected By: Manuel Cardoso	Project Title: uCTR1AX.DEG.FCTUC
Drawn By: Luis Oliveira	PCB Title: Power Board V1.0.PrjPCB
Contact: manuel.d.cardoso@sapo.pt	Sheet Title: RS485
File: RS485_SchDoc	Version: 0.1c
Date: 05-03-2018	Size: A4 Sheet 7 of 7