



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

RELATÓRIO DE ESTÁGIO

Desenvolvimento de um banco de testes para
sensores embarcados

Aluno: Felipe Maia Másculo
Professor Orientador: Jaidilson Jó da Silva

Campina Grande
Setembro de 2014

RELATÓRIO DE ESTÁGIO

Desenvolvimento de um banco de testes para
sensores embarcados

Felipe Maia Másculo
Aluno

Jaidilson Jó da Silva
Professor Orientador

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 4 |
| 2 | Apresentação da ELECTRICFIL Automotive | 5 |
| 3 | Trabalhos realizados | 6 |
| 3.1 | Estudo dos sensores | 6 |
| 3.1.1 | <i>Particulate Matter Sensor</i> - PMS | 6 |
| 3.1.2 | <i>Smart Battery Sensor</i> - SBS | 9 |
| 3.2 | Desenvolvimento do banco de testes | 11 |
| 3.2.1 | Síntese das especificações do sistema | 12 |
| 3.2.1.1 | Especificações do SBS | 12 |
| 3.2.1.2 | Especificações do PMS | 12 |
| 3.2.2 | Desenvolvimento do <i>Hardware</i> | 13 |
| 3.2.2.1 | Esquema geral do banco de testes | 13 |
| 3.2.2.2 | Medição e geração de sinais | 14 |
| 3.2.2.3 | Comunicação LIN | 15 |
| 3.2.2.4 | Comunicação CAN | 16 |
| 3.2.2.5 | Placa eletrônica de interface | 16 |
| 3.2.3 | Desenvolvimento do <i>Software</i> | 26 |
| 4 | Conclusão | 31 |
| 5 | Referências Bibliográficas | 32 |

1 Introdução

Para dar continuidade à formação em Engenharia Elétrica, no quadro de um programa de dupla-diplomação entre o INSA de Lyon (França) e a Universidade Federal de Campina Grande, realizou-se um estágio industrial de seis meses durante o primeiro ano de estudos na instituição francesa.

O estágio foi realizado de 06/02/2012 a 03/08/2012, período durante o qual o estagiário foi incorporado ao serviço de Desenvolvimento de Produtos do grupo ELECTRICFIL Automotive em seus escritórios localizados em Beynost (França), os quais correspondem à sede social, principal local de produção e centro de pesquisa e desenvolvimento do grupo.

A ELECTRICFIL concebe módulos sensores (associação do elemento sensível, eletrônica embarcada e algoritmo de processamento) para equipar seus clientes construtores automobilísticos com soluções lhes permitindo diminuir as emissões de poluentes e otimizar o consumo dos veículos. Neste contexto relativo ao desenvolvimento de sensores integrando eletrônica embarcada, a empresa elaborou uma metodologia que lhe possibilita desenvolver software com um nível de qualidade compatível com os mais altos padrões da competitiva indústria em que está inserida [7].

Dessa forma, uma parte importante de suas atividades reside em uma perfeita validação do software desenvolvido. Esta validação se faz na placa de circuito impresso (PCB) final do produto, mas os estímulos exteriores (elemento sensível, condições climáticas, comunicação, etc) são inteiramente produzidos e gerenciados pelo banco de testes.

Foi, então, neste quadro de concepção e construção de um banco de testes com o objetivo de validar o software embarcado de dois produtos da empresa em fase final de desenvolvimento que o estágio se desenvolveu. Este relatório tem a finalidade de apresentar a empresa ELECTRICFIL Automotive, o contexto do estágio e os trabalhos realizados.

2 Apresentação da ELECTRICFIL Automotive

Fornecedora da indústria automobilística (OEM - *Original Equipment Manufacturer*) de níveis 1 e 2, o grupo ELECTRICFIL fornece sistemas eletrônicos e eletromagnéticos aos principais construtores de automóveis do planeta (Volkswagen, Audi, Ford, GM, FIAT, Renault, etc.), assim como para outros fornecedores da indústria automobilística (Delphi, Bosch, etc.) [7]. A figura 1 mostra a participação dos três principais negócios do grupo ELECTRICFIL no faturamento total da empresa em 2011.

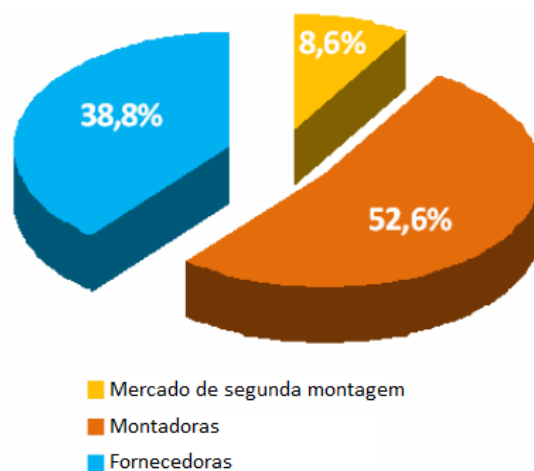


Figura 1: Participação das vendas Electricfil 2011 - a maior parte das vendas é direcionada às montadoras de automóveis.

Em 2011, o grupo obteve um faturamento de 175M€. A empresa, fundada em 1936, possui até hoje como principais acionistas pessoas físicas da família Thollin, ou seja, descendentes do fundador da empresa Johanny Thollin.

A sede do grupo ELECTRICFIL Automotive está localizada em Beynost, França, em um complexo de 83000m² que agrupa serviços técnicos, administrativos e unidades de fabricação de sensores, bobinas de ignição e atuadores. Além de filiais comerciais na Alemanha, Estados Unidos, Japão e Austrália, a empresa possui centros de produção na França, Turquia, China e Estados Unidos. O grupo contava, em 2011, com mais de 1500 funcionários espalhados pelo mundo entre os quais 120 engenheiros e técnicos focados em Pesquisa e Desenvolvimento [7].

3 Trabalhos realizados

Para alcançar os objetivos do estágio, o banco de testes desenvolvido deveria ser capaz de gerar todos os estímulos necessários para simular o funcionamento real dos sensores em questão - o *Smart Battery System* (SBS) e o *Particulate Matter Sensor* (PMS). Estes dois sensores, os quais terão seu funcionamento descrito a seguir, encontravam-se em fase final de desenvolvimento, de modo que os procedimentos de testes e validação já representavam o principal foco das respectivas equipes de desenvolvimento.

3.1 Estudo dos sensores

Uma vez que a compreensão do funcionamento dos produtos era indispensável para o desenvolvimento do banco de testes, a primeira etapa do projeto consistiu em se estudar com um certo nível de detalhes a arquitetura do *hardware* e *software* de ambos os sensores.

3.1.1 *Particulate Matter Sensor* - PMS

Há vários anos, os efeitos nocivos para a saúde pública de partículas em suspensão no ar são bem conhecidos, sobretudo aquelas geradas pela combustão incompleta de combustíveis sólidos [10]. Em um esforço com o intuito de melhorar a qualidade do ar nos centros urbanos, vários países criaram normas que limitam a concentração de partículas presentes no ar proveniente do escapamento dos veículos.

Na Europa, as normas atuais impõem a presença de um filtro de partículas na linha de escapamento de todos os veículos à diesel de forma a reduzir as emissões de fuligem. Vale salientar que na Europa, diferentemente do Brasil, os motores à diesel são muito utilizados mesmo em automóveis pequenos, o que torna o impacto dessa legislação ainda mais significativo.

Seguindo a tendência de crescente instrumentalização da linha de escapamento (ver figura 2), o PMS consiste em um sensor de fuligem que realiza o diagnóstico do filtro de partículas de motores movidos à diesel, a fim de alertar o computador

central do veículo assim que a concentração de fuligem emitida ultrapassa os limites estipulados. Seu objetivo é responder aos padrões euro6 na Europa e EPA10 nos Estados Unidos que entrarão brevemente em vigor e obrigarão os construtores automobilísticos a adicionar este tipo de sensor às linhas de escapamento de seus veículos. [4]

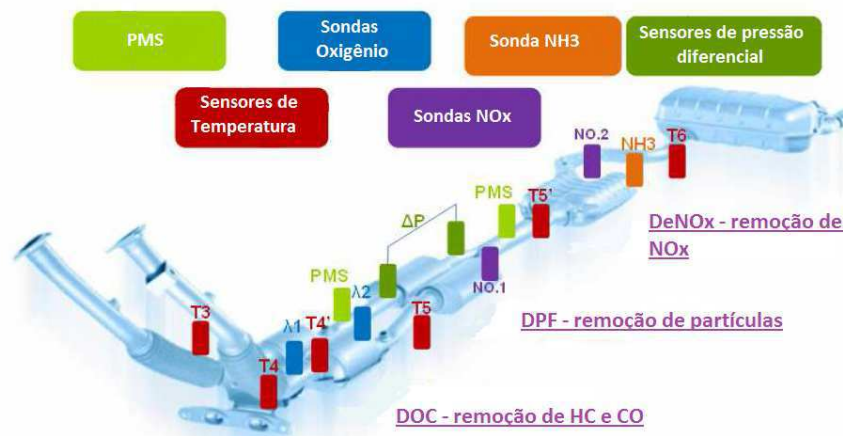


Figura 2: Linha de escapamento com o PMS - os escapamentos estão cada vez mais instrumentalizados.

O elemento sensível do PMS é constituído de uma pequena placa cerâmica com dois eletrodos entrelaçados em uma face e uma resistência de aquecimento em outra como está esquematizado na figura 3a. O sensor é inserido na linha de escapamento de modo que as partículas de fuligem que passem pelo filtro possam se depositar sobre os eletrodos.

Em funcionamento normal, os eletrodos constituem um circuito aberto, mas, quando a concentração de fuligem aumenta no escapamento (filtro de partículas com defeito), partículas começam a se depositar sobre os mesmos criando “pontes” e fazendo a resistência elétrica entre eles diminuir. É a medição desta resistência (ver figura 3b) que permite ao sensor estimar a concentração de fuligem e, portanto, o estado do filtro de partículas.

No entanto, uma vez que as partículas de fuligem se depositaram sobre os eletrodos e a medição foi realizada, o sensor estaria impossibilitado de realizar outras medições, a menos que os eletrodos fossem regenerados ao seu estado inicial. É para

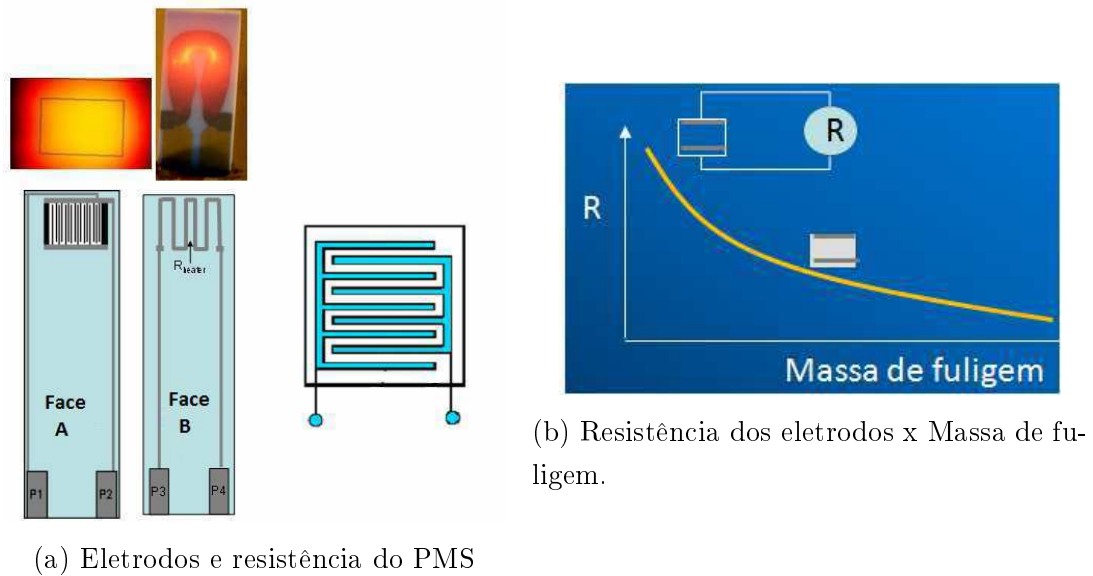


Figura 3: Princípio de funcionamento do PMS.

realizar esta função indispensável que existe a resistência de aquecimento.

Para realizar a regeneração, uma corrente é aplicada à resistência de aquecimento de forma que ela se aquece por efeito Joule. A temperatura é estimada a partir da medição do valor da própria resistência de aquecimento e é controlada por um controlador PID (Proporcional, Integral, Derivativo) digital implementado no sensor. A uma dada temperatura, a fuligem depositada sobre os eletrodos é queimada e o sensor é regenerado. O comportamento da resistência entre os eletrodos e da temperatura durante a regeneração pode ser visto na figura 4.

O PMS se comunica com os outros dispositivos do veículo, utilizando a rede CAN (Controller Area Network): protocolo lançado no fim dos anos 80 pela Bosch e que foi adotado por toda a indústria automobilística. Rede que utiliza um barramento serial de tipo multimestre, orientado para mensagens curtas e baseado sobre o princípio da difusão geral, a rede CAN eliminou a necessidade de ligar linhas dedicadas para cada informação que deve transitar no veículo (conexão ponto a ponto) [11] [9].

Na prática, existem três redes CAN diferentes em um carro:

- Um barramento muito rápido para gerenciar a segurança (freios, *Anti-lock*

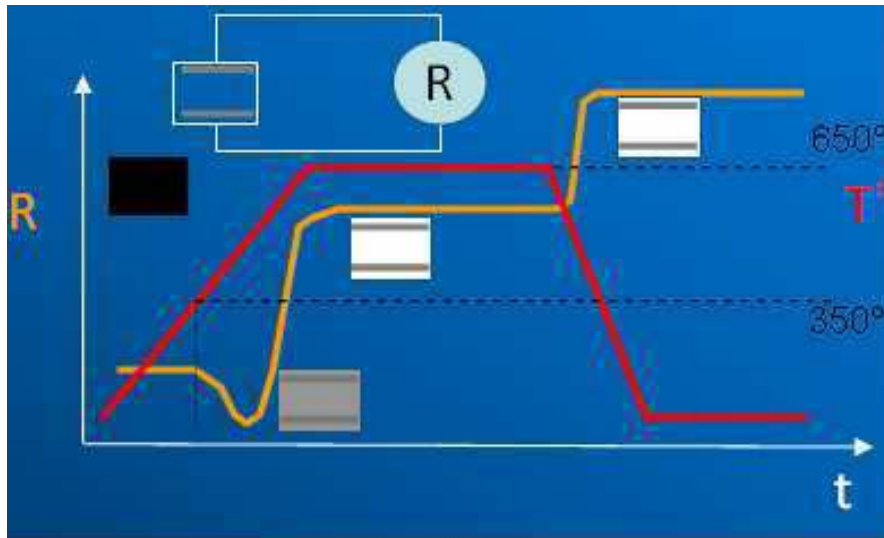


Figura 4: Perfil da regeneração do sensor - Resistência entre os eletrodos e temperatura.

braking system - ABS, detecção de choques, *airbags*, etc.);

- Um barramento de velocidade média para gerenciar o motor (comandos e sensores);
- Um barramento mais lento para gerenciar todos os acessórios (lâmpadas, vidros, botões, etc.).

Existem ainda duas subversões:

- CAN2.0A: *frame* padrão possui identificação de mensagem com 11 bits;
- CAN2.0B: *frame* mais longo com identificação de 29 bits;

3.1.2 *Smart Battery Sensor* - SBS

Com o aumento constante da presença da eletrônica embarcada nos automóveis, o consumo elétrico dos veículos tem se tornado cada vez mais significativo. Desse modo, as exigências e expectativas com relação às baterias são cada vez mais severas (ver figura 5), sobretudo quando se leva em conta o desenvolvimento de novas tecnologias como o *STOP-START* em que o motor do veículo é desligado para poupar combustível sempre que o carro se encontra em repouso. Embora

excelente do ponto de vista econômico e ambiental, essa funcionalidade representa um desafio para a bateria a cada nova partida [5].



Figura 5: Fontes de defeitos elétricos em carros (Fonte Allgemeiner Deutscher Automobil-Club 2002.)

O SBS é um sensor cuja função é realizar o monitoramento da bateria e alertar o computador de bordo do veículo sobre riscos eventuais de que a mesma não seja capaz de dar a partida no motor caso ele seja desligado.

A corrente, a tensão e a temperatura da bateria são periodicamente medidos, e estes dados são utilizados para alimentar um algoritmo que incorpora um modelo de bateria para calcular os seguintes parâmetros:

- **State of Charge (Estado de carga) - SoC:** carga restante da bateria;
- **State of Health (Estado de saúde) - SoH:** representa o envelhecimento da bateria;
- **State of Function (Estado de função) - SoF:** indica se a bateria será capaz de dar a partida no motor, de acordo com um perfil de partida enviado pelo computador de bordo;
- **Índice de confiança:** indica a pertinência das informações fornecidas pelo sensor. O índice de confiança aumenta à medida em que certos eventos se desenrolam ao longo da vida da bateria, de forma que o sensor pode calibrar os parâmetros de seu algoritmo.

A medição de corrente é feita por uma célula a efeito Hall (medição sem contato) ou pela introdução de uma resistência shunt ($100\mu\Omega$ para os veículos leves e $50\mu\Omega$ para caminhões) entre o terminal negativo da bateria e a terra (carroceria do carro). O sistema elétrico de caminhões é alimentado por uma tensão de 24V, isto é, duas baterias de 12V em série. Neste caso, uma medição de tensão suplementar é realizada: além da tensão de 24V, o sensor também mede a tensão de uma das duas baterias.

A comunicação entre o SBS e o computador de bordo do veículo é feita através de uma rede LIN (*Local Interconnect Network*), a qual é muito utilizada na indústria automobilística. A LIN é uma rede embarcada extremamente econômica (utiliza um único fio) destinada a conectar dispositivos inteligentes cujas aplicações não requeiram a banda passante elevada e a polivalência encontradas nas redes CAN.

O protocolo utilizado pela rede LIN utiliza uma abordagem mestre/escravo que envolve um mestre LIN e um ou vários escravos (o SBS é um nó escravo). A comunicação é inteiramente controlada pelo mestre que define a sequência das mensagens através de um plano de execução [8].

3.2 Desenvolvimento do banco de testes

O banco de testes é utilizado como ferramenta de teste e validação do *software* embarcado nos sensores PMS e SBS. O seu objetivo é gerar os sinais analógicos e digitais necessários para simular todas as condições de operação destes sensores, analisando, em seguida, as suas respostas aos estímulos aplicados. Desse modo, é possível verificar se o software está conforme as especificações.

O procedimento seguido para a concepção e desenvolvimento pode ser dividido em três partes:

- Síntese das especificações do sistema: elaboração de um resumo das especificações do sistema de modo a se ter uma idéia das necessidades materiais do projeto;
- Desenvolvimento do hardware: desenvolvimento ou aquisição das placas ele-

trônicas para a geração dos sinais e da comunicação;

- Desenvolvimento do software: programação dos *drivers* das placas de aquisição e de módulos de alto nível, permitindo o desenvolvimento simplificado de sequências de teste.

3.2.1 Síntese das especificações do sistema

Após o estudo dos sensores e a análise de suas exigências relativas aos respectivos softwares embarcados, as especificações precisas do sistema foram definidas em cooperação com as equipes de desenvolvimento dos produtos. Essas especificações são apresentadas de forma breve e sintética a seguir.

3.2.1.1 Especificações do SBS

O banco de testes deve ser capaz de:

- Ser compatível com todos os modelos de SBS (Shunt, Efeito Hall, caminhões e veículos leves);
- Simular variações de temperatura no intervalo de $-40^{\circ}C$ a $125^{\circ}C$;
- Simular variações de corrente na bateria de $-2000A$ a $2000A$;
- Simular a situação de Shunt desconectado (em circuito aberto);
- Simular variações de tensão de uma bateria de 0 a $40V$;
- Simular variações de tensão de 2 baterias em série de 0 a $40V$;
- Medir a potência consumida pelo sensor;
- Comunicar-se com o sensor utilizando o protocolo LIN 1.3 ou LIN 2.0.

3.2.1.2 Especificações do PMS

O banco de testes deve ser capaz de:

- Comunicar-se com o sensor utilizando o protocolo CAN 2.0B de alta velocidade com identificadores de mensagens estendidos ou não;

- Medir a tensão de polarização dos eletrodos;
- Simular variações da resistência elétrica entre os eletrodos no intervalo de $0\Omega - 100M\Omega$;
- Simular variações da resistência de aquecimento no intervalo $0\Omega - 16\Omega$;
- Validar o regulador PID utilizado durante a regeneração do sensor;
- Simular variações de tensão de alimentação de $8V$ a $18V$;
- Medir o *duty-cycle* do sinal PWM aplicado sobre a resistência de aquecimento durante a regeneração do sensor;
- Medir a potência consumida pelo sensor.

3.2.2 Desenvolvimento do *Hardware*

Como o tempo e os custos do projeto se tornariam proibitivos, o desenvolvimento interno de todos os módulos eletrônicos necessários para o banco de testes foi imediatamente descartado. Portanto, deu-se preferência a soluções já existentes no mercado.

A solução final é constituída de placas *National Instruments* utilizadas para gerenciar a comunicação com os sensores (protocolos LIN e CAN), assim como para realizar as medições e gerar os sinais analógicos e digitais. A interface entre essas placas e os sensores é feita por uma placa eletrônica desenvolvida como parte do estágio de modo a responder às necessidades específicas de cada sensor.

A escolha das placas *National Instruments* se deveu ao fato de que elas eram muito bem adaptadas às requisições do banco de testes. Além disso, as equipes do departamento de instrumentação da ELECTRICFIL têm o hábito de trabalhar com produtos NI tanto em *hardware* quanto em *software*, o que possibilitou ao projeto o aproveitamento do *know-how* e das ferramentas já presentes na empresa.

3.2.2.1 Esquema geral do banco de testes

O esquema geral do banco de testes pode ser visto na figura 6, onde as setas azuis representam os cabos que conectam os diferentes módulos que compõem o banco (a placa de aquisição de dados NI PCI 6229 necessita de 2 cabos devido ao seu grande número de saídas e entradas) e os retângulos representam pontos de conexão. Como mencionado anteriormente, o banco de testes é constituído de módulos *National Instruments* instalados em um computador, sendo responsáveis por realizar a aquisição de sinais e as comunicações CAN e LIN. A interface entre os diferentes módulos e os sensores, assim como o condicionamento dos diversos sinais são funções realizadas por uma placa eletrônica de interface desenvolvida como parte do projeto de estágio. São necessárias ainda fontes de alimentação de 12V e 40V.

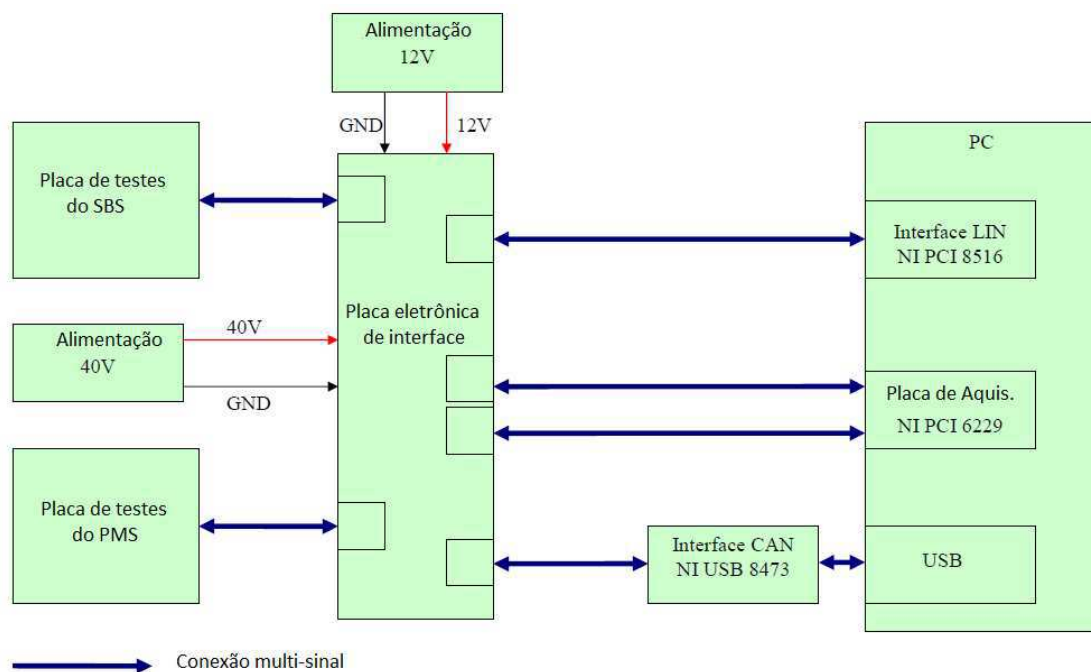


Figura 6: Esquema geral do banco de testes.

3.2.2.2 Medição e geração de sinais

Para criar os estímulos necessários e analisar as respostas dos sensores, uma placa de aquisição de sinais analógicos e digitais era indispensável. Para realizar esta

função, a solução escolhida foi o módulo de aquisição de dados **NI PCI 6229** [2].

As principais características desse módulo de aquisição são:

- 48 E/S digitais;
- Entradas analógicas:
 - 32 canais assimétricos ou 16 entradas diferenciais;
 - Intervalo de medição programável: $\pm 0.2V$, $\pm 1V$, $\pm 5V$, $\pm 10V$;
 - Resolução do CAD (Conversor Analógico-Digital): 16 bits;
- Saídas analógicas:
 - 4 canais;
 - Gama de tensão: $\pm 10V$;
 - Resolução do CDA (Conversor Digital-Analógico): 16 bits;
- Contadores digitais:
 - 2 canais;
 - 2 vias DMA (*Direct Memory Access*) que reduzem a carga do processador;
 - Resolução: 32 bits

Como a maior parte dos dispositivos *National Instruments*, o módulo **NI PCI 6229** possui um driver que facilita seu comando a partir de módulos desenvolvidos em LabVIEW.

3.2.2.3 Comunicação LIN

Como mencionado anteriormente, o SBS é um nó escravo de uma rede LIN. Por conseguinte, para realizar a comunicação com o sensor, o banco de testes deve ser capaz de realizar a função de mestre LIN, gerando todas as sequências de comunicação possíveis.

A solução escolhida para gerenciar a comunicação LIN foi a interface **NI PCI 8516** [3], cujas características mais importantes são:

- 2 canais independentes;
- Taxas de transmissão programáveis: 2400bit/s até 20kbit/s;
- Conformidade com as normas: LIN 1.3, LIN 2.0 e LIN 2.1;
- Via DMA para o acoplamento do barramento LIN à memória do computador hospedeiro, com o intuito de minimizar a latência das mensagens;
- *Timestamp* das mensagens feito em *hardware* com resolução de $1\mu\text{s}$;

A interface LIN **NI PCI 8516** possui igualmente um driver que facilita a programação em LabVIEW.

3.2.2.4 Comunicação CAN

O componente escolhido para implementar a comunicação CAN com o PMS foi a interface CAN de alta velocidade **NI USB 8473** [6] que permite a inserção do computador em uma rede CAN.

Especificações:

- 1 canal;
- Taxas programáveis: 40kbit/s até 1Mbit/s;
- Conformidade com as normas: CAN 2.0A e CAN 2.0B (identificadores estendidos ou não);
- *Timestamp* das mensagens feito em *hardware* com resolução de $1\mu\text{s}$;

3.2.2.5 Placa eletrônica de interface

Um dos projetos mais complexos do estágio, essa placa eletrônica, a qual pode ser vista na figura 7, tem o objetivo de simular vários dos estímulos enviados aos sensores e fazer a interface entre os mesmos e os outros componentes do banco de

testes. Ela é necessária, por exemplo, para adaptar os níveis de tensão gerados pelo módulo de aquisição NI às necessidades dos sensores, para realizar a simulação de resistências, variações de corrente, etc.



Figura 7: Placa eletrônica de interface.

Os módulos que compõem essa placa são descritos sucintamente a seguir.

Seleção do modo de funcionamento

Este módulo realiza a seleção do modo de funcionamento do banco de testes: SBS ou PMS. Uma saída digital da placa de aquisição de dados NI comanda um grupo de relés que seleciona quais sinais serão aplicados a cada sensor. Este módulo é importante, pois, como os dois sensores não serão testados simultaneamente, permite o compartilhamento de recursos (como saídas analógicas) entre os dois modos de funcionamento e protege as partes do banco de testes que não estejam sendo utilizadas em um dado momento.

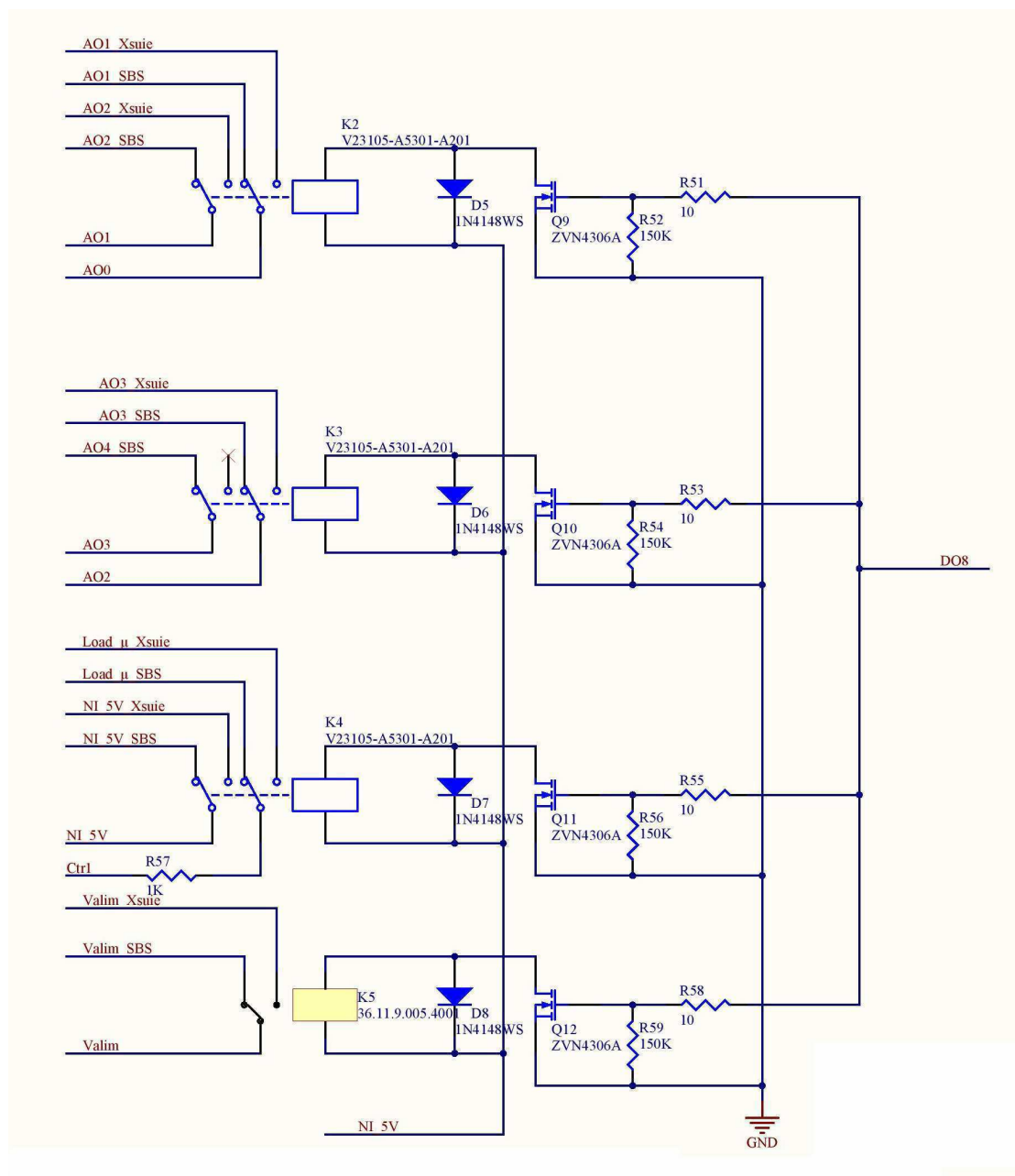


Figura 8: Seleção do modo de funcionamento.

Geração da tensão de alimentação do PMS e medição de potência

Este módulo é responsável por gerar a tensão de alimentação desejada para o PMS,

simulando as variações de tensão da bateria e de medir a potência consumida pelo sensor.

O circuito é constituído de um amplificador operacional de potência na configuração não inversora e com um ganho de 2. O amplificador, alimentado com 40V, tem como entrada a tensão gerada por uma saída analógica da placa de aquisição de dados (0V-10V) e a amplifica de modo que o PMS seja alimentado com uma tensão no intervalo de 0V-20V. O amplificador utilizado (OPA549T) pode fornecer uma corrente de 8A continuamente, se os cuidados necessários de dissipação de calor forem observados.

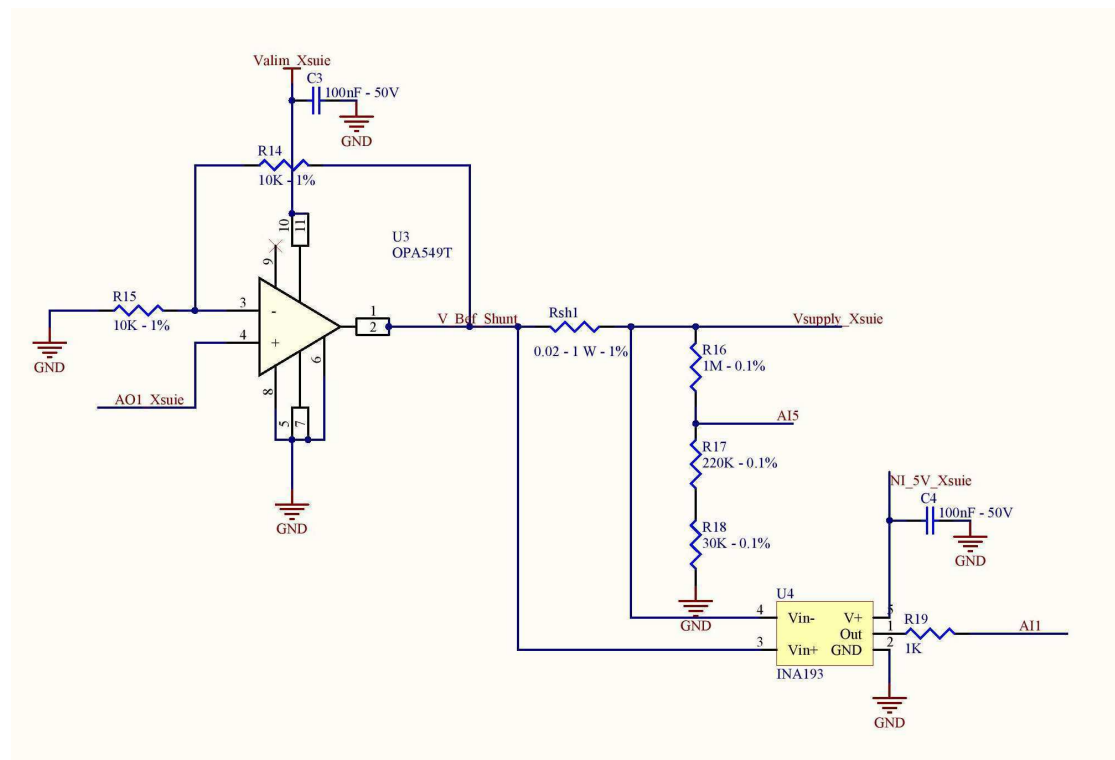


Figura 9: Geração de tensão de alimentação e medição de potência - PMS.

Uma resistência shunt foi introduzida na saída do módulo para medir a potência consumida pelo sensor. A queda de tensão nos terminais da resistência é medida e amplificada por um amplificador de instrumentação, o que proporciona uma indicação da corrente consumida pelo sensor.

Cálculos térmicos para o amplificador OPA549T:

O amplificador possui uma temperatura de junção máxima de $150^{\circ}C$. A temperatura de junção é dada pela equação 1 [1]:

$$T_J = T_A + P_D \cdot \theta_{JA} \quad (1)$$

onde:

- T_J = Temperatura da junção ($^{\circ}C$);
- T_A = Temperatura do ar ($^{\circ}C$);
- P_D = Potência dissipada (W);
- θ_{JA} = Resistência térmica Junção x Ar ($^{\circ}C/W$).

Para sinais DC como no caso presente, a potência dissipada pelo amplificador (P_D) é igual ao produto da corrente de saída pela tensão no transistor de saída em condução. Nesse caso, P_D pode ser expresso como:

$$P_D = (V_S - V_O) \cdot I_O \quad (2)$$

onde

- V_S = Tensão de alimentação (40V);
- V_O = Tensão de saída;
- I_O = Corrente de saída.

Para manter a temperatura de junção inferior a $130^{\circ}C$ ($20^{\circ}C$ de margem de segurança), considerando $T_A = 25^{\circ}C$ e nenhum dissipador ($\theta_{JA} = 30^{\circ}C/W$), a potência máxima que pode ser dissipada é:

$$P_{Dmax} = \frac{T_J - T_A}{\theta_{JA}} = \frac{130^{\circ}C - 25^{\circ}C}{30^{\circ}C/W} = 3,5W \quad (3)$$

Portanto, supondo o pior caso ($V_O = 8V$), a corrente contínua máxima permitida é:

$$I_{Omax} = \frac{P_{Dmax}}{V_S - V_O} = \frac{3,5W}{40V - 8V} = 109,4mA \quad (4)$$

Este valor de corrente é elevado o suficiente para alimentar o sensor, exceto em caso de regeneração com uma resistência de aquecimento real. Caso essa situação seja desejada, as modificações seguintes podem ser feitas para reduzir o aquecimento do amplificador:

- Reduzir a tensão de alimentação a 20V;
- Introduzir um dissipador térmico, por exemplo, **Thermalloy 6396B** (θ_{JA} se reduz a $5,2^\circ C/W$).

Com essas modificações, encontramos:

$$P_{Dmax} = \frac{T_J - T_A}{\theta_{JA}} = \frac{130^\circ C - 25^\circ C}{5,2^\circ C/W} = 20,19W \quad (5)$$

$$I_{Omax} = \frac{PD_{max}}{V_S - V_O} = \frac{20,19W}{20V - 8V} = 1,68A. \quad (6)$$

Portanto, com as modificações propostas o banco de testes é capaz de fornecer uma corrente elétrica suficientemente elevada para que o sensor realize regeneração com uma resistência de aquecimento real, caso essa condição de funcionamento deseje ser testada.

Simulação da resistência de aquecimento

Este módulo é utilizado para simular a resistência de aquecimento do PMS. Isso é realizado através da utilização de um MOSFET em série com uma resistência de 2Ω .

Controlando-se a tensão aplicada ao gate do MOSFET, varia-se a sua resistência Dreno-Fonte. Dessa forma, é possível simular valores de resistência no intervalo de aproximadamente 2Ω (quando a tensão no gate é elevada, a resistência do MOSFET é quase nula) à praticamente uma resistência infinita (quando a tensão no gate é nula, a resistência do MOSFET é muito elevada). Um transistor em paralelo usado em comutação permite a simulação de curtos-circuitos.

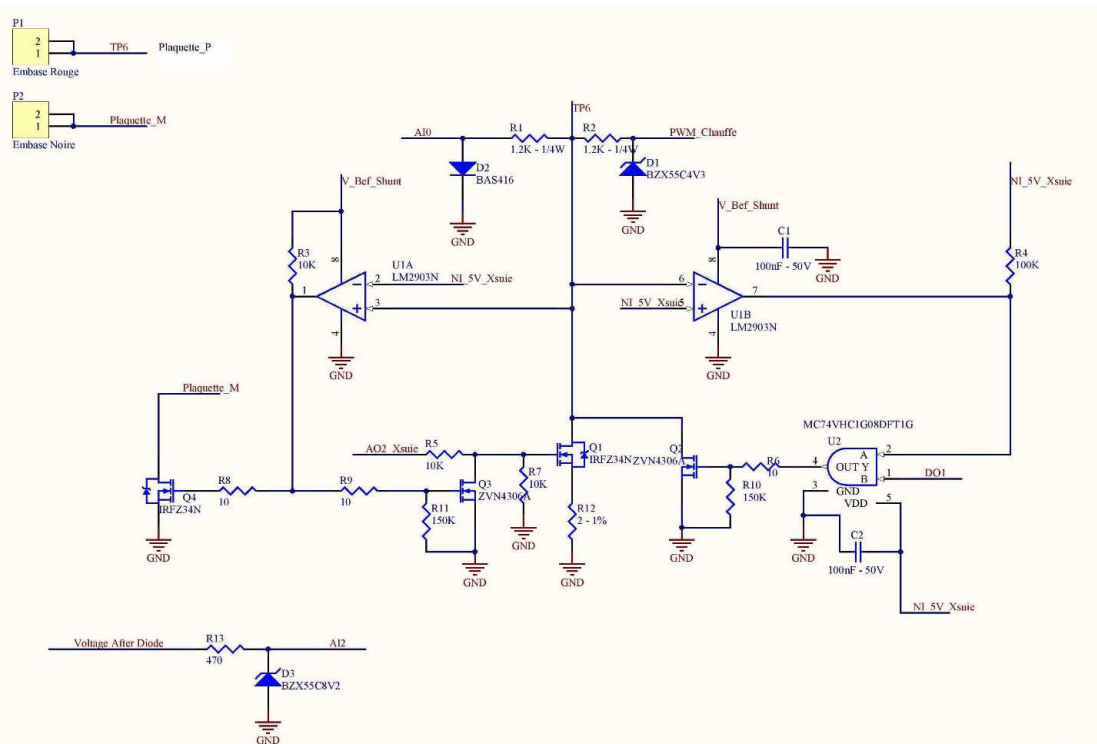


Figura 10: Simulação de resistência de aquecimento - PMS.

O circuito desenvolvido para realizar a função descrita pode ser observado na figura 10. O transistor Q1, em série com a resistência R12, é o responsável pela simulação da resistência de aquecimento propriamente dita, enquanto o restante dos componentes são utilizados para efetuar medições ou proteger o circuito em caso de regeneração do sensor.

Simulação da resistência entre os eletrodos do PMS

A resistência entre os eletrodos do PMS é medida a partir de uma ponte divisora de tensão, como ilustrado na figura 11. Uma tensão de polarização é aplicada ao terminal $R+$ dos eletrodos, ao mesmo tempo em que a tensão no terminal $R-$, a qual é uma função do valor da resistência entre os eletrodos (equação 7), é medida.

$$V_{R-} = V_{pol} \cdot \frac{R_C}{R_C + R_e} \quad (7)$$

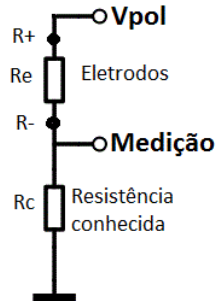


Figura 11: Esquema para a medição da resistência entre os eletrodos.

Para simular as variações de resistência entre os eletrodos, a tensão de polarização gerada pelo sensor é medida no terminal R+ dos eletrodos, e a tensão apropriada, de acordo com o valor de resistência desejado, é aplicada ao terminal R-. O procedimento é ilustrado na figura 12.

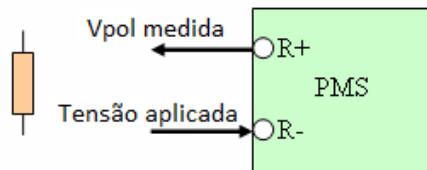


Figura 12: Simulação da resistência elétrica entre os eletrodos.

Geração da tensão de alimentação SBS e medição de potência

Este módulo gera as tensões 24V (simulando 2 baterias em série) e 12V (1 única bateria) ao mesmo tempo em que mede a potência consumida pelo SBS. De maneira análoga ao módulo concebido para o PMS, ele é composto de amplificadores operacionais de potência em configurações não inversoras, mas dessa vez com ganho de 4.

Os amplificadores são alimentados com 40V e têm duas saídas analógicas da placa de aquisição de dados como suas entradas. As tensões de saída são, portanto,

no intervalo 0V-40V. Como se pode ver na figura 13, a potência consumida pelo sensor é medida na linha de 24V de forma idêntica à utilizada para o PMS. Não é necessário medir a potência na linha de 12V, pois o sensor é alimentado apenas pela linha de 24V, não havendo, portanto, consumo de corrente na linha de tensão menor.

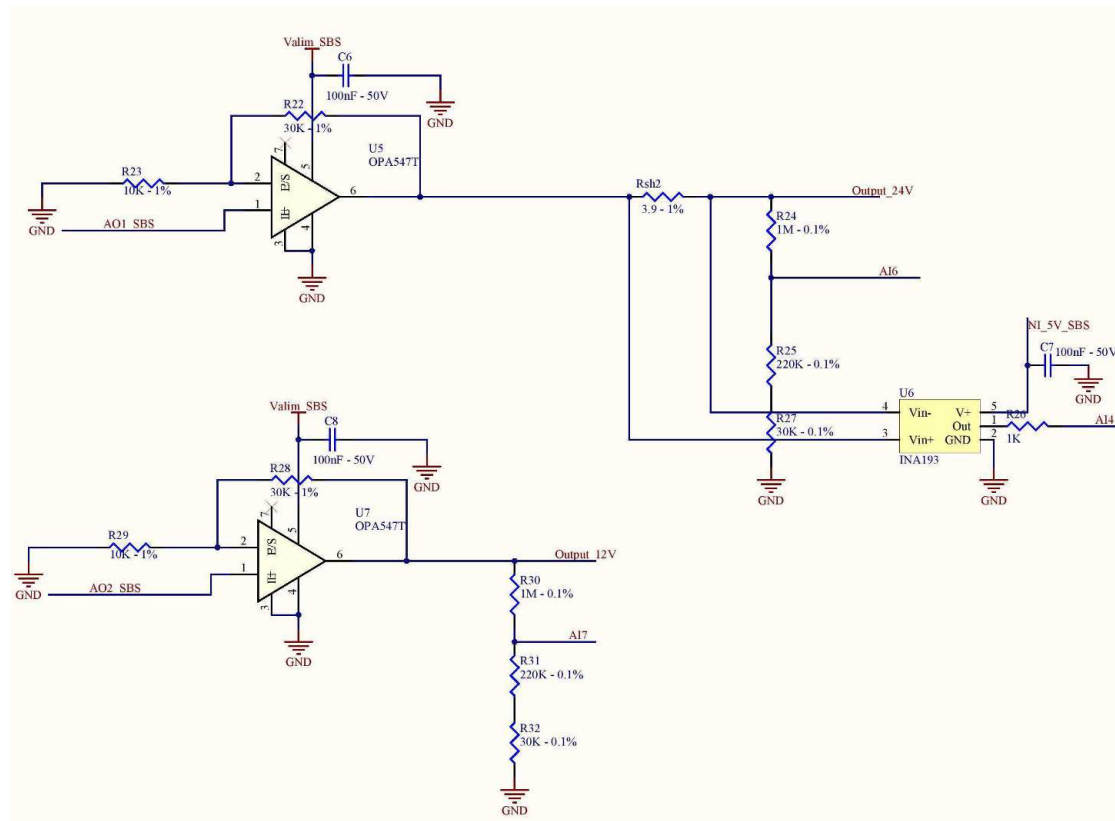


Figura 13: Geração de tensão de alimentação e medição de potência - SBS.

Cálculos térmicos similares aos feitos anteriormente dão os seguintes resultados:

$$PD_{max} = \frac{T_J - T_A}{\theta_{JA}} = \frac{130^{\circ}C - 25^{\circ}C}{65^{\circ}C/W} = 1,61W \quad (8)$$

$$I_{Omax} = \frac{PD_{max}}{V_S - V_O} = \frac{1,61W}{40V - 8V} = 50,3mA. \quad (9)$$

Conclui-se, portanto, que o amplificador é capaz de fornecer corrente suficiente para alimentar o SBS sem risco de superaquecimento.

Simulação de corrente no SBS

A simulação de corrente para o SBS, no caso de um sensor shunt, é realizada aplicando-se diretamente aos terminais do sensor a tensão diferencial correspondente à corrente que se quer simular.

Como o módulo de aquisição de dados NI não é capaz de gerar de forma precisa os valores de tensão requeridas por essa aplicação, três pontes divisoras de tensão foram introduzidas para melhorar a precisão em três intervalos distintos. As mudanças de polaridade são feitas por um comutador analógico (similar a um relé de estado sólido). A desconexão do shunt é simulada com um relé.

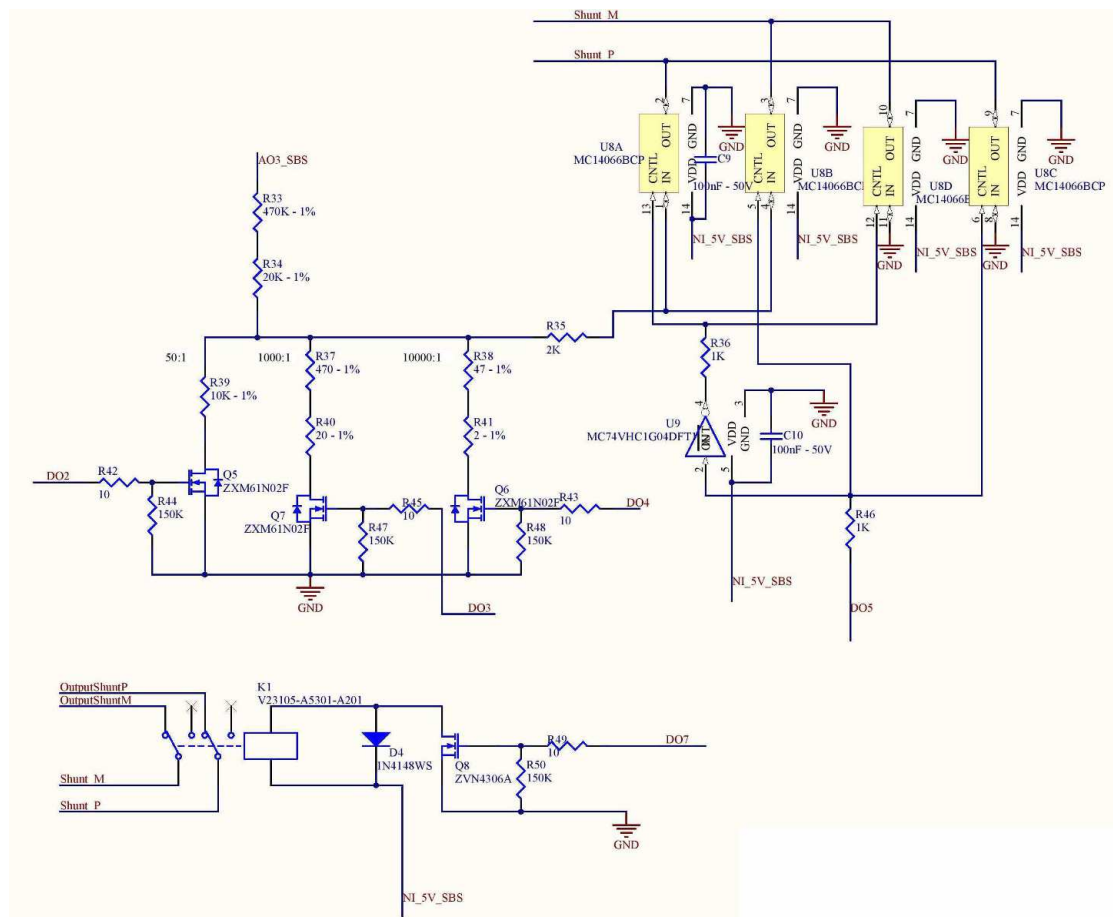


Figura 14: Simulação de corrente - SBS.

Cálculo de resolução:

A placa de aquisição NI possui uma resolução de $3230\mu V$. A resolução da corrente simulada pode, então, ser expressa por:

$$\text{Resolução(A)} = 3230\mu V \times \frac{1}{\text{Fator divisor de tensão}} \times \frac{1}{\text{Resistência shunt}(\mu\Omega)} \quad (10)$$

Resolução para o shunt de $50\mu\Omega$ (caminhões):

- Intervalo $\pm 20A$: $3230\mu V \times \frac{1}{10000} \times \frac{1}{50\mu\Omega} = 6,46mA$
- Intervalo $\pm 200A$: $3230\mu V \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{50\mu\Omega} = 64,6mA$
- Intervalo $\pm 4000A$: $3230\mu V \times \frac{1}{50} \times \frac{1}{50\mu\Omega} = 1292mA$

Resolução para o shunt de $100\mu\Omega$ (veículos leves):

- Intervalo $\pm 10A$: $3230\mu V \times \frac{1}{10000} \times \frac{1}{100\mu\Omega} = 3,23mA$
- Intervalo $\pm 100A$: $3230\mu V \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{100\mu\Omega} = 32,3mA$
- Intervalo $\pm 2000A$: $3230\mu V \times \frac{1}{50} \times \frac{1}{100\mu\Omega} = 646mA$

No caso dos sensores à efeito Hall, a corrente é simulada pelo envio de um frame SENT idêntico ao que seria enviado por uma célula à efeito Hall.

3.2.3 Desenvolvimento do *Software*

O desenvolvimento do software do banco de testes se baseou em linguagens próprias da *National Instruments*, mais especificamente LabVIEW e TestStand. Inicialmente, o LabVIEW foi utilizado para codificar todas as funções de baixo nível necessárias para gerenciar o hardware do banco de testes. Este trabalho foi facilitado pela escolha de dispositivos *National Instruments*, os quais possuem drivers específicos para simplificar a sua programação com LabVIEW.

Os módulos desenvolvidos nesta etapa realizam, entre outras, as funções abaixo:

- Escrita de frames genéricos seguindo o protocolo LIN, utilizando a interface **NI 8516**;

- Leitura de frames genéricos seguindo o protocolo LIN, utilizando a interface NI 8516;
- Escrita de frames genéricos seguindo o protocolo CAN, utilizando a interface NI 8473;
- Leitura de frames genéricos seguindo o protocolo CAN, utilizando a interface NI 8473;
- Geração de sinais analógicos, utilizando o módulo de aquisição NI 6229;
- Geração de sinais digitais, utilizando o módulo de aquisição NI 6229;
- Medição de sinais analógicos, utilizando o módulo de aquisição NI 6229;
- Medição de sinais digitais, utilizando o módulo de aquisição NI 6229.

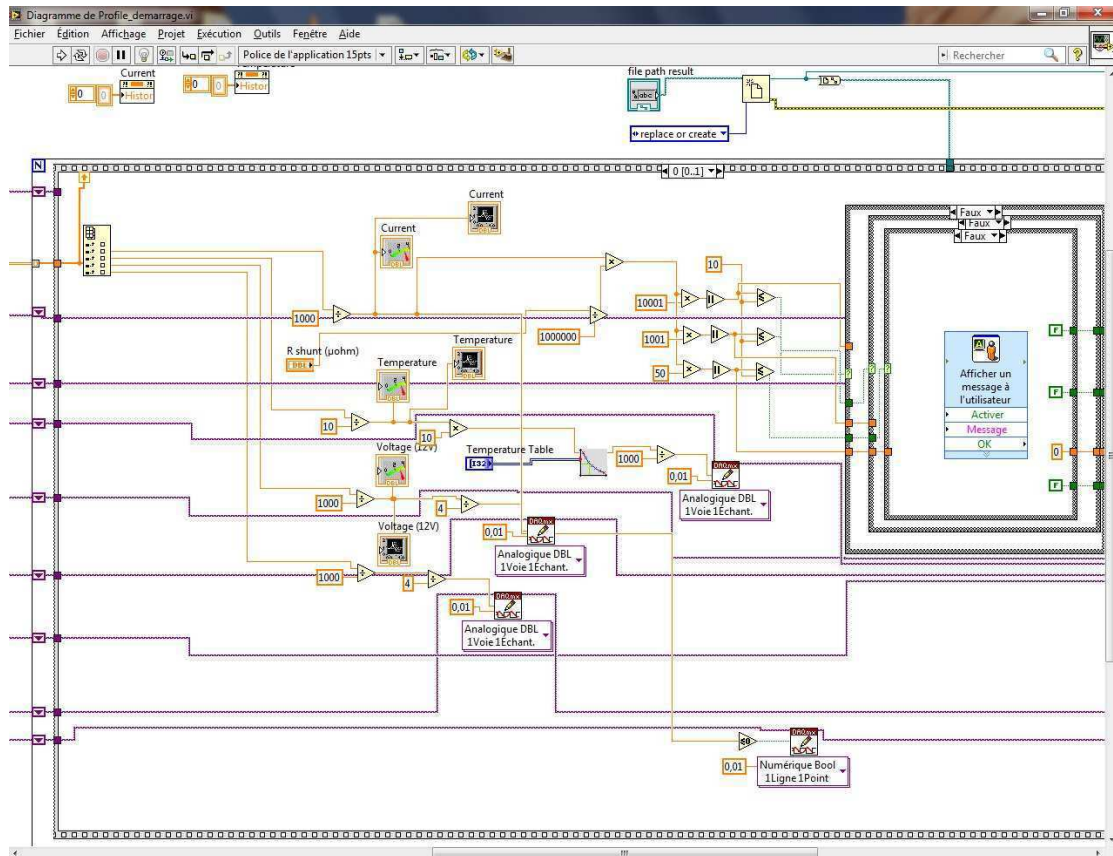


Figura 15: Interface de desenvolvimento LabVIEW.

Uma vez que as funções de gestão do hardware estavam feitas, o desenvolvimento dos módulos de alto nível necessários para a realização dos testes pôde começar. Tais módulos tiram proveito das funções de baixo nível para realizar operações mais complexas e que possuem um sentido físico importante.

As operações realizadas pelos códigos desenvolvidos são, por exemplo:

Comunicação:

- Gestão do sequenciador de mensagens LIN;
- Construção de frames de diagnóstico a partir de arquivos descritivos;
- Decodificação de frames enviados pelo SBS e visualização das informações recebidas;
- Realização de sequências de comunicação CAN para a calibração, alteração de parâmetros e regeneração do PMS;
- Decodificação de frames de medição enviados pelo PMS e visualização das informações recebidas;
- Medição do tempo decorrido entre a recepção de dois frames CAN;

Geração de estímulos para o SBS:

- Variação das tensões de alimentação;
- Medição da potência consumida pelo sensor;
- Simulação de variações de corrente;
- Simulação de shunt em circuito-aberto;
- Simulação de variações de temperatura;

Geração de estímulos para o PMS:

- Variação da tensão de alimentação;
- Medição da potência consumida pelo sensor;

- Simulação de variações da resistência entre os eletrodos do sensor;
- Simulação de variações da resistência de aquecimento;
- Medição da tensão de polarização aplicada sobre os eletrodos.

TestStand é um ambiente de gestão de testes utilizado para desenvolver, gerenciar e executar sequências de teste. No caso do banco de testes desenvolvido, as sequências de teste integram os módulos escritos em LabVIEW.

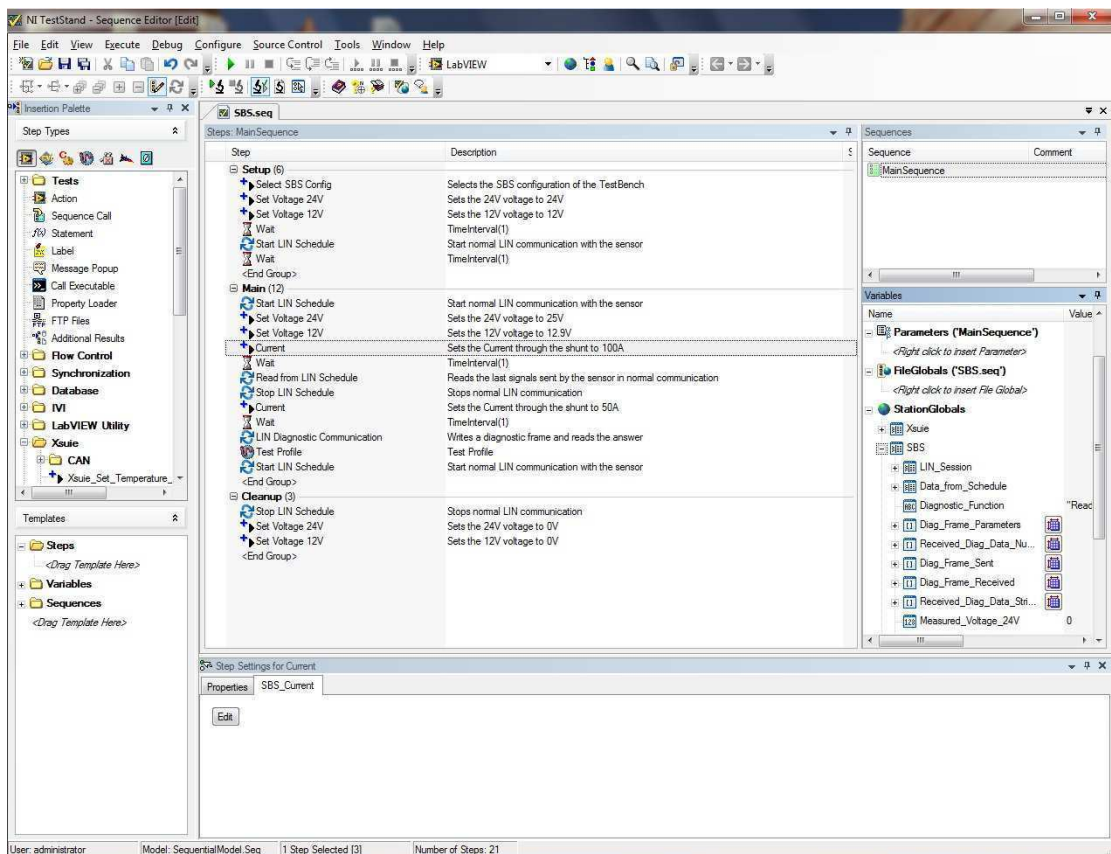


Figura 16: Interface de desenvolvimento TestStand.

A figura 16 corresponde à interface de desenvolvimento de testes do TestStand. No caso do banco de testes desenvolvido, cada linha de código escrita no TestStand corresponde ou a uma VI desenvolvida em LabVIEW ou a um teste propriamente dito. Por exemplo, na primeira linha de código visível na figura temos “*Select SBS*

Config”, ou seja, o TestStand está chamando um módulo desenvolvido em LabVIEW o qual realiza as ações necessárias para selecionar o modo de funcionamento SBS do banco de testes.

4 Conclusão

Os 6 meses desta primeira experiência profissional representaram uma oportunidade de descobrir o meio empresarial, seu funcionamento e organização. O fato de estar inserido na indústria automobilística tornou esse estágio ainda mais interessante e, como estudante estrangeiro na França, a experiência foi ainda mais enriquecedora, uma vez que foi possível acompanhar o trabalho de engenheiros e técnicos de uma cultura diferente.

Do ponto de vista técnico, devido ao tema do estágio ser tão vasto, foi possível pôr em prática diversos conhecimentos obtidos na universidade como a eletrônica analógica, programação, instrumentação eletrônica, aquisição de dados, etc., mas também de aprender a utilizar novas ferramentas e técnicas como o LabVIEW, TestStand, projetos de placas de circuito impresso, etc..

As principais dificuldades encontradas ao longo do estágio foram todas relacionadas ao desenvolvimento e testes dos circuitos analógicos. A empresa possuía um bom acervo de componentes eletrônicos, porém, para a realização de testes frequentemente havia necessidade de se comprarem componentes específicos, o que levava um tempo considerável durante o qual o projeto não podia avançar satisfatoriamente. Este fato prejudicou a realização dos testes, impedindo a detecção de alguns pequenos problemas que poderiam ter sido facilmente corrigidos antes da fabricação da placa eletrônica final.

5 Referências Bibliográficas

- [1] High-voltage, high-current operational amplifier - opa 549 datasheet. URL <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/opa549.pdf>.
- [2] Ni pci 6229 website. URL <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/14136>. Acessado em 23/09/2014.
- [3] Ni pci 8516 website. URL <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/208358>. Acessado em 23/09/2014.
- [4] Particulate matter sensor website. Online. URL http://www.electricfil.com/en/innovations_solutions/our_business/applications/exhaust_line.aspx. Acessado em 23/09/2014.
- [5] Smart battery system website. URL http://www.electricfil.com/fr/innovations_solutions/our_business/applications/sbs.aspx. Acessado em 23/09/2014.
- [6] Ni pci 8473 website. URL <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/203384>. Acessado em 23/09/2014.
- [7] Electricfil automotive website. Online. URL <http://www.electricfil.com/en/>. Acessado em 23/09/2014.
- [8] Lin (local interconnect network) solutions. Technical report, STMicroelectronics, 2002. URL http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application_note/CD00004273.pdf. Acessado em 23/09/2014.
- [9] Controller area network (can) overview. Technical report, National Instruments, 2014. URL <http://www.ni.com/white-paper/2732/en/>.
- [10] Bert Brunekreef e Stephen T Holgate. Air pollution and health. *The lancet*, 360(9341):1233–1242, 2002. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140673602112748>.
- [11] M Farsi, K Ratcliff, e Manuel Barbosa. An overview of controller area network. *Computing & Control Engineering Journal*, 10(3):113–120, 1999. URL http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=788104.