

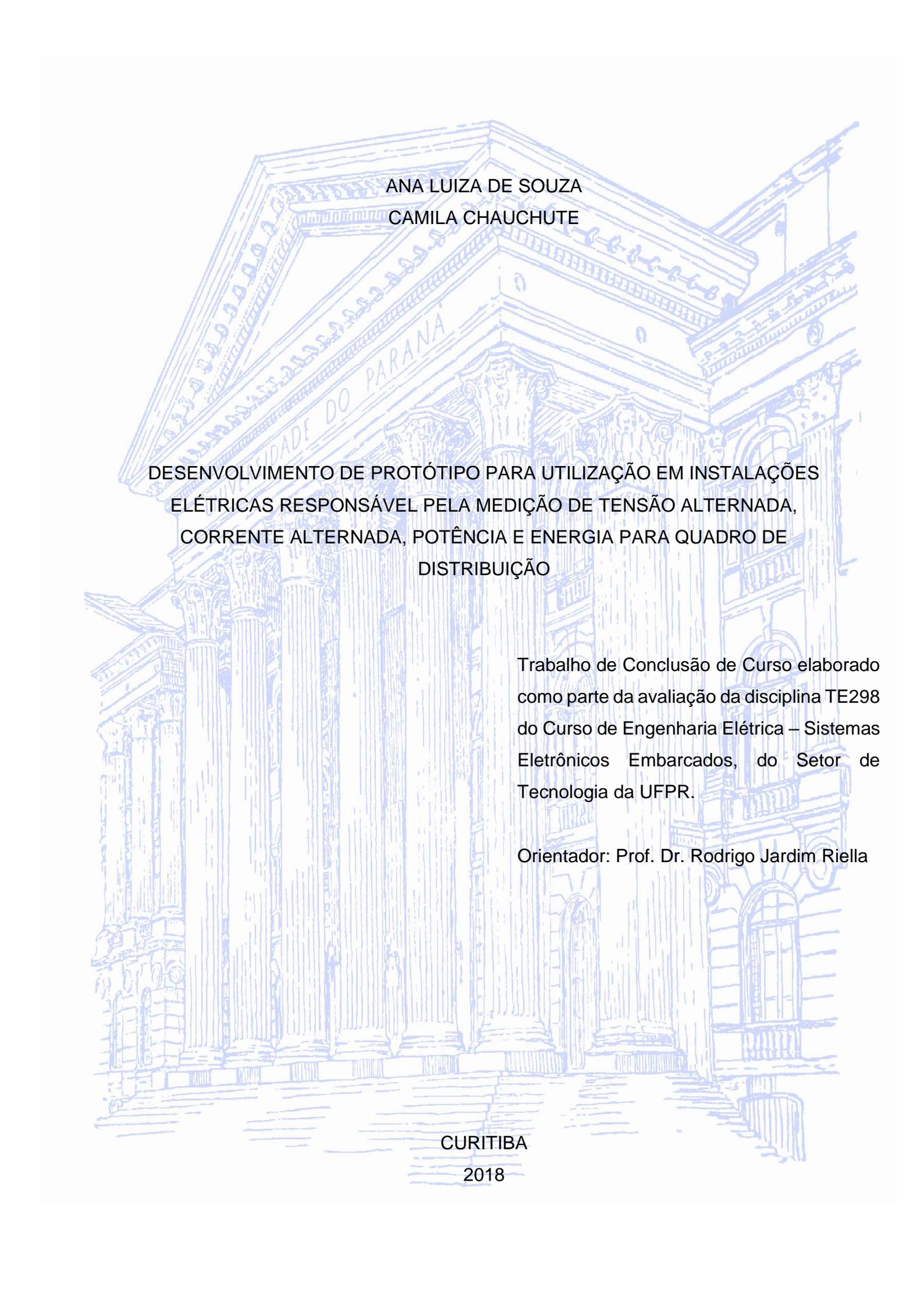
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA LUIZA DE SOUZA
CAMILA CHAUCHUTE

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO PARA UTILIZAÇÃO EM INSTALAÇÕES
ELÉTRICAS RESPONSÁVEL PELA MEDIÇÃO DE TENSÃO ALTERNADA,
CORRENTE ALTERNADA, POTÊNCIA E ENERGIA PARA QUADRO DE
DISTRIBUIÇÃO

CURITIBA

2018



ANA LUIZA DE SOUZA
CAMILA CHAUCHUTE

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO PARA UTILIZAÇÃO EM INSTALAÇÕES
ELÉTRICAS RESPONSÁVEL PELA MEDIÇÃO DE TENSÃO ALTERNADA,
CORRENTE ALTERNADA, POTÊNCIA E ENERGIA PARA QUADRO DE
DISTRIBUIÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso elaborado
como parte da avaliação da disciplina TE298
do Curso de Engenharia Elétrica – Sistemas
Eletrônicos Embarcados, do Setor de
Tecnologia da UFPR.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Jardim Riella

CURITIBA
2018

TERMO DE APROVAÇÃO

ANA LUIZA DE SOUZA

CAMILA CHAUCHUTE

Trabalho de Conclusão de Curso aprovada como requisito parcial à obtenção de título de Engenheiro Eletricista, Curso de Engenharia Elétrica – Sistemas Embarcados Eletrônicos, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Rodrigo Jardim Riella

Orientador – Departamento Engenharia Elétrica

Prof. Dr. Edemir Luiz Kowalski

Departamento Engenharia Elétrica

Prof. Dr. Cleverson Luiz da Silva Pinto

Departamento Engenharia Elétrica

Curitiba, 04 de dezembro de 2018.

RESUMO

Observando-se a fatura mensal de energia elétrica é possível encontrar o consumo total e as tarifas a serem pagas. O consumidor final não possui nenhuma forma de controle ou detalhamento sobre o que é consumido em suas instalações. O presente trabalho levou em conta dois pontos principais: proporcionar ao usuário o monitoramento contínuo de uma instalação elétrica a partir dos circuitos do quadro de distribuição, facilitando assim o controle dos gastos com energia elétrica e ajudar ao usuário a verificar se a rede em que está conectado é uma rede estável e saudável. Trata-se de projetar um protótipo voltado para efetuar medições de parâmetros em uma instalação elétrica, a partir dos conceitos de Redes Inteligentes, tendo como principais medidas a serem feitas: tensão alternada [V], corrente alternada [A], potência [W] e energia [kWh]. Usou-se um circuito integrado de medição – CI M90E36A, o microcontrolador STM32F401RE Núcleo 64 e sensor de corrente não-invasivo SCT – 013 – 20 A.

Palavras-chave: Protótipo. Medição. Corrente alternada. Tensão alternada. Potência. Energia. Quadro de distribuição.

ABSTRACT

Looking at the monthly electricity bill you can find the total consumption and the tariffs to be paid. The final consumer has no way of controlling or detailing what is consumed in their premises. The present work took into account two main points: to provide the user with the continuous monitoring of an electrical installation from the distribution board circuits, thus facilitating the control of electricity expenses and to help the user to verify that the network in which he is connected is a stable and healthy network. The main measures to be taken are: alternating voltage [V], alternating current [A], power [W], and energy [kWh]. An integrated measuring circuit - IC M90E36A, the microcontroller STM32F401RE Core 64 and non-invasive current sensor SCT-013-20A were used.

Keywords: Prototype. Measurement. Alternating current. Alternating voltage. Power. Energy. Switchboard.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	CONTEXTO E PROBLEMA	7
1.2	OBJETIVOS	8
1.2.1	Objetivo Geral	8
1.2.2	Objetivos Específicos	9
1.3	JUSTIFICATIVA	9
2	REVISÃO	10
2.1	SENSOR DE CORRENTE	14
2.1.1	SCT – 013 – 20 A	15
2.2	CIRCUITO INTEGRADO M90E36A	16
2.3	MICROCONTROLADOR STM32F401RE NÚCLEO 64	19
2.4	DIAGRAMA BLOCOS	21
3	METODOLOGIA	22
4	PROJETO	23
4.1	PRIMEIRA PCI	23
5	RESULTADOS	35
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	45
	REFERÊNCIAS	46
	ANEXO 1 – ESQUEMA ELÉTRICA TRANSFORMADOR DE CORRENTE	48
	ANEXO 2 – DATASHEET DO SENSOR DE CORRENTE SCT – 013	49

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E PROBLEMA

Numa rápida observação de como a energia elétrica é fornecida ao consumidor nos dias atuais chega-se à conclusão de que continuam sendo seguidos os princípios básicos da criação da primeira rede de energia elétrica feita em 1888, por Nikola Tesla. Desde então, não ocorreram inovações tecnológicas significativas na área de distribuição de energia elétrica (EGGEA, 2014) para encarar desafios como ameaças à segurança, possibilidade de uso de energia alternativa, metas de economia para redução de picos de demanda, ainda que tenham surgido avanços nas áreas de telecomunicações, computação e eletrônica (MME, 2011).

Historicamente a construção dos sistemas elétricos de distribuição e geração ocorreu num período em que a confiabilidade era baseada no excesso de capacidade de geração elétrica, com o fluxo de eletricidade unidirecional das usinas para os consumidores de modo que o sistema continua a funcionar da mesma forma há décadas.

O crescimento da população mundial e da economia tem gerado uma maior demanda por energia elétrica. Porém, a capacidade de geração não tem acompanhado esse ritmo, ainda que as concessionárias de energia elétrica estejam sob pressão (TROWLER, WHITAKER, 2008).

Tradicionalmente a gestão da geração de energia, da rede de distribuição e das cargas têm sido consideradas como processos bem independentes, contudo, essa abordagem inicial está gradativamente mudando. Uma quantidade considerável de recursos energéticos renováveis (geração distribuída) e recursos energéticos ativos (cargas, baterias e veículos elétricos híbridos plug-in) estão em crescimento, porém para a interconexão de tais recursos a atual rede de distribuição ainda existem barreiras referentes a necessidade do balanço da potência produzida e consumida,

para que não haja distúrbios nos níveis de frequência e estabilidade da rede. A solução para realizar o gerenciamento eficiente e confiável da geração distribuída está nas redes elétricas inteligentes - *Smart Grids*, que por sua vez, devem ser mais confiáveis, interligadas, controláveis e protegidas, em comparação as redes convencionais.

Smart Grid ou rede elétrica inteligente pode ser entendida como um conceito de transformação da rede de energia tradicional através do uso de controles automáticos avançados, técnicas de comunicações e outras formas de tecnologia da informação, na integração de novas ferramentas e técnicas de geração, transmissão e distribuição (MOKRYANI *et al.*, 2010).

Destacam-se algumas características das redes elétricas inteligentes: podem automaticamente se auto recuperar, evitar falhas, problemas na qualidade de energia e podem atenuar as interrupções naturais ou produzidas pelo homem; permite aos consumidores uma melhor gestão do consumo da energia elétrica; reduz perdas de energia elétrica no geral (técnicas ou comerciais); a concessionária pode fornecer energia com alto índice de qualidade e com menor preço; permitem gerenciar as formas de geração e opções de armazenamento; beneficiam o mercado de energia varejista e de microgeração tornando o setor mais competitivo; podem otimizar a utilização dos ativos, minimizando operações e custos de manutenção (CUSTÓDIO, 2013).

Observando-se a fatura mensal de energia elétrica é possível encontrar o consumo total e as tarifas a serem pagas. O consumidor final não possui nenhuma forma de controle ou detalhamento sobre o que é consumido em suas instalações – origem do problema levantado neste trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Projetar um protótipo voltado para efetuar medições de parâmetros em uma instalação elétrica, a partir dos conceitos de Redes Inteligentes, tendo como principais medidas a serem feitas: tensão alternada [V], corrente alternada [A], potência [W] e energia [kWh].

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) verificar qual o melhor CI a ser utilizado para a aplicação proposta;
- b) realizar revisão teórica para compreender o funcionamento do CI de medição;
- c) escolher o microcontrolador a ser utilizado;
- d) elaborar diagrama em blocos do protótipo;
- e) desenvolver placa de circuito impresso para utilização do CI de medição;
- f) desenvolver programação para aquisição dos dados obtidos pelo CI de medição;
- g) validar os dados obtidos;
- h) definir e implantar a IHM a ser utilizada;
- i) efetuar testes finais de bancada e em quadro de distribuição geral.

1.3 JUSTIFICATIVA

A escolha do projeto do micromedidor se deu por dois pontos principais: proporcionar ao usuário o monitoramento contínuo de uma instalação elétrica a partir dos circuitos do quadro de distribuição, facilitando assim o controle dos gastos com energia elétrica e ajudar ao usuário a verificar se a rede em que está conectado é uma rede estável e saudável.

2 REVISÃO

O sistema atual de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil conta com usinas de geração que injetam eletricidade em um sistema de transmissão de alta tensão, sendo este composto por fios e cabos responsáveis pelo transporte da energia gerada até os centros de distribuição, os quais estão incumbidos por baixar a tensão para que seja possível a utilização desta energia em casas, comércios e indústrias, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1: Sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica atuais no Brasil



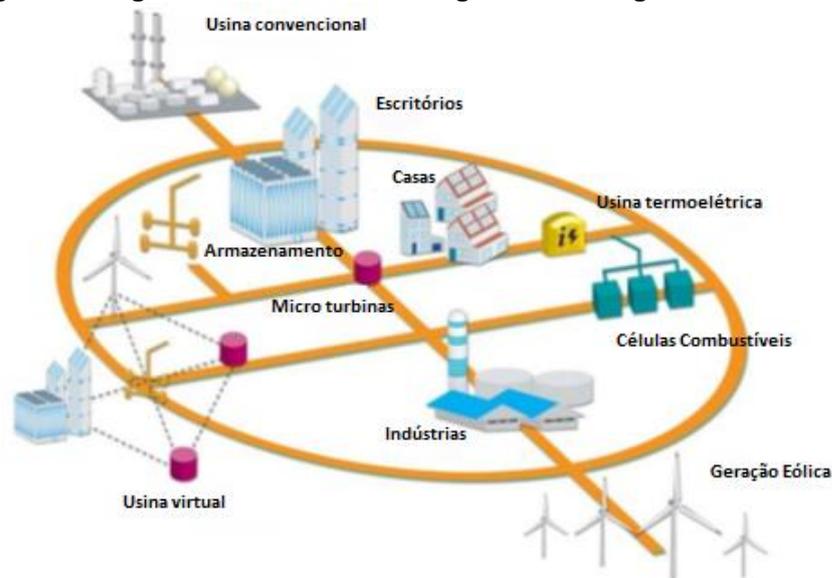
Fonte: Pantoja Industrial (2010)

Os sistemas de geração de energia estão passando por mudanças fundamentais, tendo como ênfase a baixa emissão de carbono e a responsabilidade pelo lado da demanda, o que ainda provocará uma profunda transição do modelo de

infraestrutura centralizada para um modelo de geração distribuída (CHEUNG *et al.*, 2010), a qual poderá ser derivada de energias renováveis como energia solar, energia eólica e que já estão rapidamente se tornando partes integrantes dos sistemas de geração ao redor do mundo (BLAABJERG; CHEN; KJAER, 2004).

A integração das fontes renováveis através do conceito de geração distribuída, em que a usina convencional como é conhecida deixa de ser a única fonte de energia e passa a compartilhar espaço com usinas termoelétricas, células combustíveis, microturbinas, aerogeradores e ainda com a microgeração residencial, por exemplo, utilizando-se de painéis fotovoltaicos e sistemas de armazenamento através de baterias, conforme Figura 2.

Figura 2: Diagrama de uma Rede Inteligente de Energia - Smart Grid



Fonte: Eggea (2014) – Adaptado de ImpresaGreen (2010)

Não apenas os sistemas elétricos de geração, transmissão e distribuição continuam a funcionar do mesmo modo há décadas como a infraestrutura de monitoramento do consumo de energia elétrica não acompanhou o desenvolvimento tecnológico e continua apoiando-se nos mesmos princípios tais como a necessidade da visita de um funcionário da concessionária em cada residência para coletar o consumo. Com a necessidade de se reduzir o desperdício e melhorar o controle sobre o consumo, novas formas de monitorar o uso da energia estão sendo desenvolvidas e testadas em todo o mundo (ALMEIDA, 2011). Entre elas, se destacam: AMR – *Automatic Meter Reading* (Leitura de Medidor Automática) - sistema que não necessita da visita do funcionário da concessionária ao consumidor, pois o medidor

envia os dados de consumo direto à concessionária, possibilitando maior flexibilidade na forma de taxação que poderá ser anualmente, mensalmente ou até diariamente. Outro benefício é a maior compreensão do consumo (GUEDES, 2013). Segundo Eggea (2014) a maioria dos investimentos em infraestrutura estão focados na medição do sistema de distribuição, através da leitura automática de medidores (do inglês, *Automatic Meter Reading - AMR*), que permite ler os dados de consumo, alarmes e estado das instalações do cliente. Ainda que pareça atrativa, a tecnologia AMR não resolve o maior problema que é a gerência pelo lado da demanda, pois tem como característica a comunicação unidirecional. Assim sua utilização fica limitada a ler os dados do medidor, não permitindo a transição para as redes elétricas inteligentes – *Smart Grids*. Por isso, as distribuidoras pelo mundo passaram a utilizar *Advanced Meter Infrastructure - AMI* que permite comunicação bidirecional com o medidor (FARHANGI, 2010). AMI – *Automatic Meter Infrastrutura* (Infraestrutura de Medição Automática) - sistema similar ao AMR, porém seus medidores são capazes de mensurar, ler e analisar o consumo de energia e prover de maneira fácil o acesso a essas informações, tanto para a concessionária quanto para o consumidor. Esse tipo de informação de tempo em tempo possibilita uma ação em prol da redução do desperdício pelo consumidor (GUEDES, 2013). Para Eggea (2014) trata-se do primeiro passo para tornar a rede elétrica tradicional em uma rede elétrica inteligente, pois adiciona diversas novas funcionalidades no medidor, o qual passa a servir de canal de comunicação entre a concessionária e consumidores. Essa infraestrutura inclui novas redes de comunicação, banco de dados, sistemas de gerenciamento de dados de medição e um centro de medição, local onde todo o sistema é monitorado de forma *online*. Já o AMM – *Automatic Meter Management* (Gerenciamento de Medidor Automático) - trata-se de uma extensão do AMI. O diferencial está na capacidade de ajudar o consumidor a gerenciar seu consumo, visando sempre a reduzir o desperdício e obter maior eficiência energética (GUEDES, 2013).

A maioria das pessoas tem uma vaga ideia sobre a quantidade de energia que estão usando e apenas recebem uma fatura mensalmente. Tornar o consumo de energia prontamente visível pode promover um uso realmente eficiente de energia em uma cidade. Mostrar informações úteis com a medição inteligente é de interesse às famílias e concessionárias de energia elétrica.

Segundo a Agência Internacional de Energia (2014), o consumo interno de energia representa aproximadamente 20% do consumo mundial de energia. Sendo

assim, Nardello (2017) destaca que é fundamental otimizar a eficiência das casas, eliminando dessa forma a energia desperdiçada e promovendo ações que possam corresponder ao consumo de pessoas com a disponibilidade ou previsão de energia renovável.

Revela ainda que eficientes algoritmos para monitoramento de cargas podem ser executados diretamente nos medidores, permitindo ideias e serviços inovadores para economizar energia e fornecer feedback ao consumidor. Tal proposta é conhecida como Resposta à Demanda (DR), que oportuniza o deslocamento de cargas intencionalmente em resposta a mudanças de preço ou como troca de recompensas. Essas iniciativas oferecem a possibilidade de otimizar rede de transmissão e distribuição, aumentando a carga voluntariamente quando a fonte de alimentação estiver mais disponível (presença de energias renováveis), ou reduzindo a carga quando a fonte de alimentação é particularmente apertada, sem produzir impacto significativo na rotina dos consumidores. Além disso, um feedback específico do dispositivo permite que os consumidores identifiquem cargas que exigem muito eletricidade de modo a motivá-los a substituir por produto mais eficiente ou adaptar seu comportamento de consumo.

Há vantagens para consumidores e concessionárias. Para os clientes, é possível melhorar seu consumo de energia, adaptando seus hábitos com base nas sugestões fornecidas pelo medidor inteligente, podendo assim economizar. Já as concessionárias, considerando as informações fornecidas pelos medidores de energia podem verificar se um cliente que aceita pedidos de DR realmente desliga alguns dispositivos selecionados para atender à solicitação, implementar a demanda Side Management (DSM) para encorajar os consumidores a usar menos energia durante as horas de pico ou promover incentivos financeiros a quem se ajustar fora dos horários de pico ou ainda implementar estratégias diferentes para previsão de carga que melhor adaptem a produção e distribuição de energia.

Para que seja possível medir o consumo, duas grandezas físicas são fundamentais: a tensão e a corrente de linha.

Segundo Alexander e Sadiku (2003) “corrente elétrica é a taxa de variação da carga em relação ao tempo e é medida em ampères [A]”. A relação entre a corrente i , a carga q e o tempo t pode ser expressa matematicamente conforme equação (1):

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1)$$

Sendo i medido em ampères [A], sendo 1 ampère = 1 coulomb/segundo. Podem ainda ser diferenciadas em: corrente contínua (uma corrente que permanece constante ao longo do tempo) e corrente alternada (uma corrente que varia senoidalmente com o tempo).

Para Alexander e Sadiku (2003) tensão ou ainda diferença de potencial é a “energia necessária para mover uma unidade de carga através de um elemento; é medida em volts (V)”. Destacam ainda que uma tensão, denominada cc, é representada por [V]. Já uma tensão que varia senoidalmente com o tempo é chamada de tensão ca, sendo representada por [v].

Relacionam também potência e energia com tensão e corrente, pois “potência é a variação de energia em função da variação do tempo; é medida em watts [W]”. A energia descrita poderá ser liberada ou absorvida. Tal relação entre a potência p em watts [W], a energia w em joules [J] e o tempo t em segundos (s) pode ser escrita matematicamente conforme equação (2):

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (2)$$

Sendo que a potência instantânea é uma grandeza que varia com o tempo e é obtida pelo produto da tensão aplicada ao elemento pela corrente que o atravessa. Matematicamente, pode-se escrever a equação (3):

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = vi \rightarrow p = vi \quad (3)$$

Historicamente o primeiro medidor de energia elétrica foi criado em 1888 por Oliver Blackburn Shallenberger, baseado num medidor de ampère-hora para corrente alternada, passando posteriormente a ser adotado como padrão pela indústria.

2.1 SENSOR DE CORRENTE

Segundo Teixeira (2009) um sensor de corrente permite que o valor de corrente seja interpretado pelo sistema de tratamento de dados e para isso existem várias

técnicas que permitem a sua montagem. Existem diversos tipos de sensores de correntes, cada um para uma determinada aplicação. São eles: transformador de corrente (TC); resistor shunt; bobina de Rogowski e sensor de efeito Hall.

O transformador de corrente (TC) transforma a corrente que circula no enrolamento primário em uma corrente proporcional no enrolamento secundário através do princípio de funcionamento da indução eletromagnética. Tem como vantagem a existência de um isolamento galvânico que fornece uma proteção física para o equipamento (ALMEIDA, 2011). Ainda segundo Lettieri (2009) no secundário do transformador é possível acoplar um amperímetro de modo a medir a corrente que passa com precisão. Destaca-se ainda que, apesar de ser um excelente meio de medição de corrente, suas dimensões e custo elevado prejudicam sua maior utilização.

2.1.1 SCT – 013 – 20 A

Trata-se de um sensor de corrente não-invasivo, ou seja, não é necessário interceptar a rede para efetuar a medição de corrente como no caso do ACS712 – principal razão para mudança de sensor. SCT significa *Split-core Current Transformer*, isto é, transformador de corrente de núcleo dividido. Para fazer a medição de corrente elétrica, este sensor possui uma bobina interna em sua estrutura como é possível verificar na Figura 3.

Figura 2: Bobina interna do SCT-013



Fonte: Portal vida de silício (2011)

O *datasheet* do sensor de corrente SCT – 013 apresenta uma tabela que relaciona seus diferentes modelos e as respectivas correntes de entrada e saída. Tais dados são relacionados na Tabela 1.

Tabela 1: Diferentes modelos do SCT – 013 e respectivos parâmetros técnicos

Modelo	SCT-013-000	SCT-013-005	SCT-013-010	SCT-013-015	SCT-013-020
Corrente de entrada	0 – 100 A	0 – 5 A	0 – 10 A	0 – 15 A	0 – 20 A
Corrente de saída	0 – 50 mA	0 – 1 V	0 – 1 V	0 – 1 V	0 – 1 V
Modelo	SCT-013-025	SCT-013-030	SCT-013-050	SCT-013-060	SCT-013-000V
Corrente de entrada	0 – 25 A	0 – 30 A	0 – 50 A	0 – 60 A	0 – 100 A
Corrente de saída	0 – 1 V	0 – 1 V	0 – 1 V	0 – 1 V	0 – 1 V

Fonte: Datasheet SCT 013

Conforme o *datasheet* - Anexo 2 - há ainda as seguintes especificações:

- Material do core: ferrite;
- Dielétrico: 6000V AC/1min;
- Taxa anti-chama: UL94-V0;
- Plug de saída: 3,5 mm;
- Dimensão abertura: 13 mm x 13 mm;
- Temperatura de trabalho: - 25° a + 70° C;
- Comprimento do cabo: 150 cm.

Considerando-se que o projeto se destina a quadros de distribuição, optou-se pelo sensor SCT-013-20 A, apresentado na Figura 3.

Figura 4: Sensor SCT-013-20A



Fonte: Filipeflop (2018)

2.2 CIRCUITO INTEGRADO M90E36A

Existem vários circuitos integrados medidores de energia no mercado, tais como: o CI M90E36A (da *Microchip*); o CI 78M6613 (da *MaximIntegrated*); o CI ADE7757 (da *Analog Devices*); o CI MCP3909 (da *Microchip*); o CI 90E32A (da *Microchip*); o CI 71M6533/G/H – 71M6534/H (da *Maxim Teridian*); o CI CS5463 (da *Cirrus Logic*); o CI SA9903B (da *Sames*).

Levantou-se os seguintes dados: circuito integrado, seu fabricante, quantidade de ADC, tensão de alimentação, faixa de tensão de operação, interface de comunicação, temperatura de operação, parâmetros e erros de medição, preço e prazo de entrega, link do *datasheet*. Seguem os dados obtidos a partir dos *datasheets* na Tabela 2.

Tabela 2: Comparativo entre os circuitos integrados de medição

Circuito integrado	M90E36A	78M6613	ADE7757	MCP3909
Fabricante	MICROCHIP	MAXIM INTEGRATED	ANALOG DEVICES	MICROCHIP
Quantidade de ADC	7 (I1, I2, I3, IN, V1, V2, V3)	4 (A0, A1, A2, A3)	2 - (V1P, V1N, V2P, V2N)	2 - (CH0+, CH0-, CH1+, CH1-)
Tensão de alimentação	3,3V	3,3 V	5V	5V
Faixa de tensão de operação	2,8 ~ 3,6V	3,0 ~3,6 V	-	4,5 ~ 5,5V
Interface de comunicação	SPI / DMA	UART	SPI	SPI
Temperatura de operação	-40 °C ~ +85 °C	-40 °C ~ +85 °C	-40 °C ~ +85 °C	-40 °C ~ +125 °C
Parâmetros de medição	Vrms, Irms, kW, kVAR, kVA, Freq, FP e θ	Vrms, Irms, kW, kVAR, kVA, freq, FP	kW, kVAR, kVA	Vrms, Irms
Erro de medição	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,1\%$
Preço	R\$ 35,00 (ML)	R\$24,00 (AE) Prazo de entrega: 60 dias	R\$ 20,00 (ML)	R\$ 16,00 (ML)
Datasheet	http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-46004-SE-M90E36A-Datasheet.pdf	https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/78M6613.pdf	http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7757.pdf	http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22025C.pdf
Circuito integrado	90E32A	71M6533/G/H - 71M6534/H	CS5463	SA9903B

Fabricante	MICROCHIP	Maxim Teridian	CIRRUS LOGIC	SAMES
Quantidade de ADC	6 (I1, I2, I3, V1, V2, V3)	7 (IAP/IAN, VA, IBP/IBN, VB, ICP/ICN, VC, and IDP/IDN)	2 (VIN+, VIN-, IIN+, IIN-)	2 (IVP, IIP, IIN)
Tensão de alimentação	3,3 V	3,3 V	5V	2,5V
Faixa de tensão de operação	2,8 ~ 3,6V	3,0 ~3,6 V	4,75 ~ 5,25V	2,25 ~2,75V
Interface de comunicação	SPI	SPI	SPI	SPI
Temperatura de operação	-40 °C ~ +85 °C	-40 to 85 °C	-40 °C ~ +85 °C	-40 °C ~ +85 °C
Parâmetros de medição	Vrms, Irms, kW, kVAR, kVA, Freq, FP e θ	Wh, VARh,	V, I, P, Vrms, Irms, kW, kVAR, kVA, Freq e FP	Vrms, kW, kVAR e Freq
Erro de medição	$\pm 0,5\%$	< 0.1%	$\pm 0,4\%$	-
Preço	Indisponível	Indisponível	R\$ 95,00 (ML)	R\$236,00 (AE) Indisponível
Datasheet	http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-Meter-ATM90E32A-Datasheet-Eng_0402.pdf	https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/71M6533-71M6534H.pdf	https://statics.cirrus.com/pubs/proDataSheet/CS5463F3.pdf	http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/sames/SA9903BSA.pdf

Fonte: Autoria própria (2018)

Levando-se em conta as informações técnicas, a disponibilidade, o preço e prazo de entrega – cruciais para o desenvolvimento do projeto – optou-se pelo CI M90E36A – Fabricante: Microchip, apresentado na Figura 5.

Figura 5: CI M90E36A



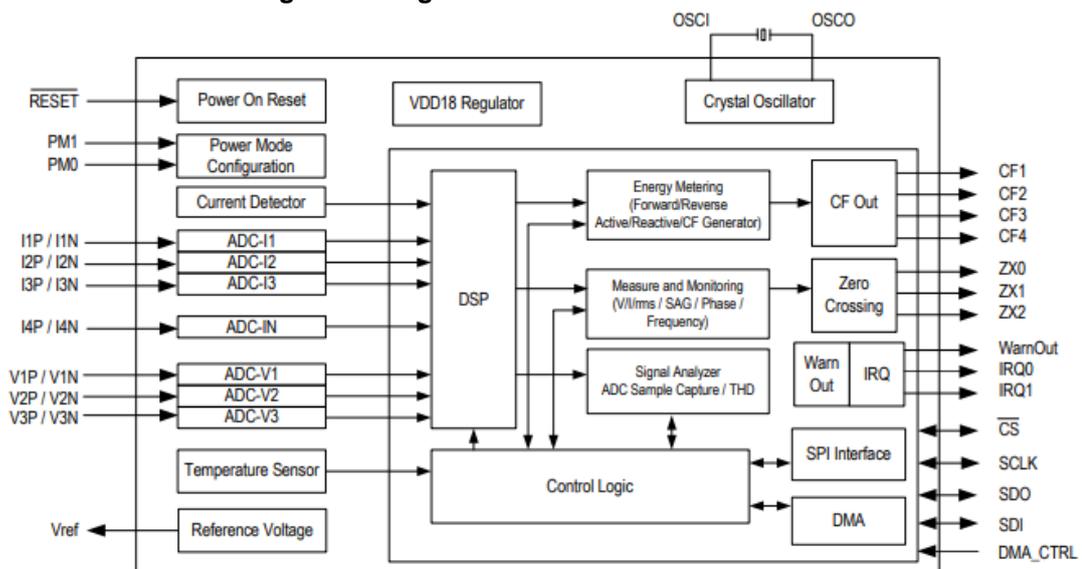
Fonte: Datasheet Atmel M90E36A

Dados técnicos levantados junto ao datasheet do CI M90E36A:

- Quantidade de ADC: 7 (I1, I2, I3, IN, V1, V2, V3);
- Tensão de alimentação: 3,3 V;
- Faixa de tensão de operação: 2,8 ~ 3,6 V;
- Temperatura de Operação: -40 °C ~ +85 °C;
- Interface de comunicação: SPI / DMA;
- Parâmetros de medição: Tensão RMS (Vrms), Corrente RMS (Irms), potência ativa (kW), potência reativa (kVAR), potência aparente (kVA), frequência, Fator de Potência (FP) e ângulo de fase;
- Erro de medição: $\pm 0,5\%$.

A Figura 6 apresenta o diagrama de blocos do CI M90E36A, retirado do *datasheet*.

Figura 6: Diagrama de blocos do CI M90E36A



Fonte: Datasheet Atmel M90E36A. M90E36A Diagrama de bloco

2.3 MICROCONTROLADOR STM32F401RE NÚCLEO 64

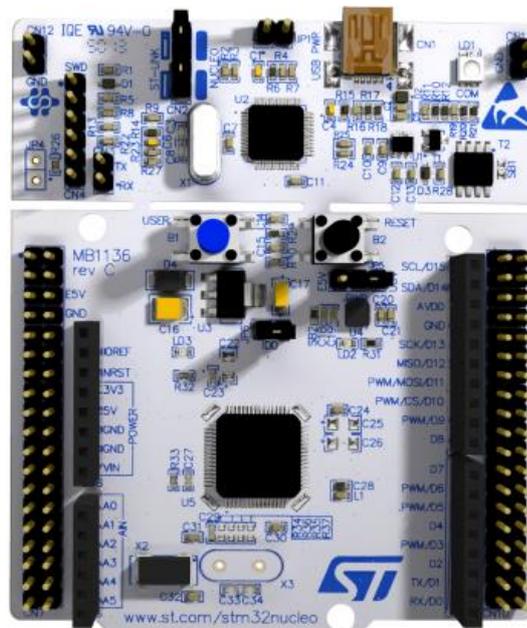
O microcontrolador escolhido para o desenvolvimento do projeto é STM32F401RE Núcleo 64, apresentado na Figura 7, pois já tinha-se disponível. Além disso apresenta acesso de alto desempenho, alta integração, menor custo e rica conectividade para diversas aplicações.

Compartilhando os mesmos conectores, as placas STM32 Núcleo 64 podem ser facilmente estendidas com um grande número de complementos de hardware de

aplicativos especializados (o núcleo-64 inclui conectores Arduino Uno rev3 e ST morpho, o Nucleo-32 inclui conectores Arduino Nano). A placa STM32 núcleo-64 não requer nenhuma sonda separada, pois integra o depurador e o programador ST-LINK / V2-1.

O processador ARM® Cortex®-M4 com FPU é a última geração de processadores ARM para sistemas embarcados. Foi desenvolvido para fornecer uma plataforma de baixo custo que atende às necessidades de Implementação MCU, com uma contagem de pinos reduzida e baixo consumo de energia, enquanto fornece excelente desempenho computacional e uma resposta avançada a interrupções.

Figura 7: Microcontrolador STM32F401RE Núcleo 64



Fonte: UM1724 User manual. STM32F401RE.

Os dispositivos STM32F401XD / XE são baseados no ARM® Cortex® -M4 32-bit de alto desempenho núcleo RISC bit operando a uma frequência de até 84 MHz. Seu núcleo Cortex®-M4 apresenta uma precisão única da unidade de ponto flutuante (FPU) que suporta todo o processamento de dados de precisão única ARM instruções e tipos de dados. Também implementa um conjunto completo de instruções DSP e uma unidade de proteção de memória (MPU) que aumenta a segurança da aplicação. O STM32F401xD / xE incorpora memórias embutidas de alta velocidade (512 Kbytes de Flash memória, 96 Kbytes de SRAM) e uma extensa gama de I / Os e periféricos melhorados conectado a dois barramentos APB, dois barramentos AHB e uma matriz

de barramento multi-AHB de 32 bits. Todos os dispositivos oferecem um ADC de 12 bits, um RTC de baixa potência, seis temporizadores de 16 bits de uso geral incluindo um timer PWM para controle de motor, dois *timers* de uso geral de 32 bits. Eles também apresentam interfaces de comunicação padrão e avançadas.

Esses recursos tornam os microcontroladores STM32F401xD / xE adequados para uma ampla gama de aplicações: acionamento do motor e controle de aplicativos; equipamento médico; aplicações industriais: CLP, inversores, disjuntores; impressoras e scanners; sistemas de alarme, vídeo porteiro e HVAC; aparelhos de áudio em casa; hub sensor de telefone celular.

Quanto a sua eficiência, o seu dimensionamento dinâmico permite que a corrente de consumo ao executar o flash de memória seja de 89 μA / MHz. No modo *soneca*, o consumo de energia pode ser de 6 μA .

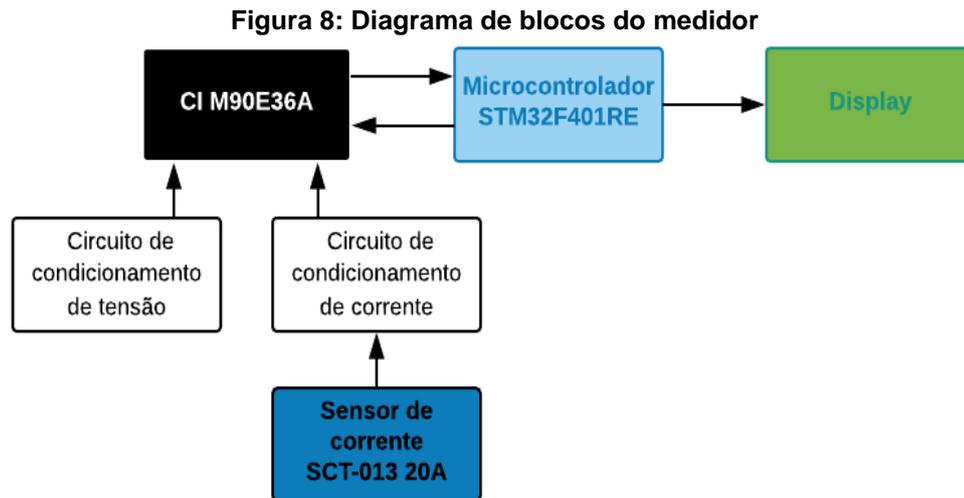
Apresentam 128 kB a 1,5 MB de memória Flash e até 320 kB de SRAM.

Outras características ainda podem ser listadas, tais como:

- 10x USARTs até 12,5 Mbits / s;
- Até 5x SPI (misturado com I²S) até 50 Mbit / s;
- Até 4x I²C até 1 Mbits / s;
- 1x SDIO até 48 MHz;
- 1x USB 2.0 OTG velocidade máxima;
- Até 18x timers de 16 e 32 bits em execução até 100 megahertz;
- Interface paralela de LCD, modos 8080/68003.

2.4 DIAGRAMA BLOCOS

Para uma melhor compreensão do projeto, elaborou-se um diagrama de blocos, o qual é mostrado na Figura 8.



Fonte: Autoria própria (2018)

3 METODOLOGIA

Num primeiro momento foi realizado um estudo de cunho bibliográfico para escolha do CI de medição e microcontrolador a partir de *datasheets* e componentes já disponíveis.

Desenvolveu-se, então, o diagrama de blocos para visualização da estrutura do protótipo em uma ferramenta *online* chamada *Lucidchart*.

O passo seguinte contou com a pesquisa dos componentes eletrônicos necessários e disponíveis no mercado para realização da montagem da placa de circuito impresso.

Foi dado início à comunicação do microcontrolador com software STM32CubeMX, no qual é setado o que cada pino no microcontrolador fará, o programa realiza uma pré-montagem da programação na qual salvamos o projeto e abrimos no Keil uVision 5, plataforma em que serão acrescentadas informações que serão compiladas e debugadas.

A placa de circuito impresso foi desenvolvida no software EAGLE, a qual será responsável pela comunicação do CI de medição com o microcontrolador.

Uma segunda placa foi desenvolvida usando o programa Altium, considerando-se varistores na entrada como proteção.

A etapa seguinte envolve a comunicação do CI de medição com o microcontrolador para aquisição dos dados de medição.

Sequencialmente será estudado o meio de visualização das medições obtidas por meio de uma interface digital a ser definida.

Por fim, serão realizados os testes finais de bancada e em quadro de distribuição para validação do protótipo.

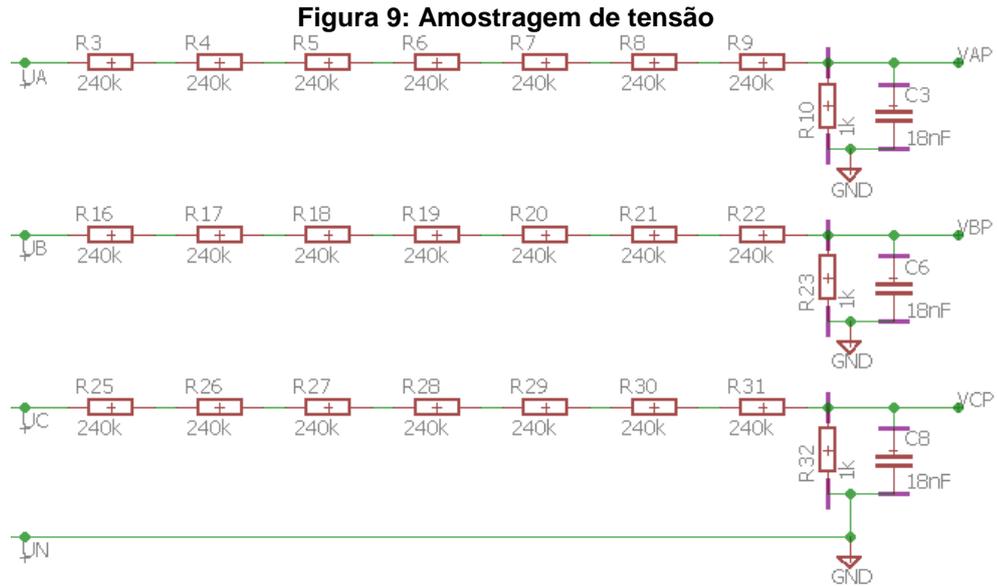
4 PROJETO

4.1 PRIMEIRA PCI

Estudando o *datasheet* do circuito integrado M90E36A, verificou-se a necessidade da escolha do esquema elétrico, o qual é apresentado no *Application Note*. O esquema elétrico escolhido foi o de transformador de corrente, apresentado como Apêndice. Tal esquema é fundamental para o desenvolvimento do projeto da placa de circuito impresso e conseqüentemente sua confecção.

Na construção da PCI para utilização do circuito integrado M90E36A, utilizou-se o software EAGLE. Foi necessária a criação do circuito integrado M90E36A na biblioteca do EAGLE

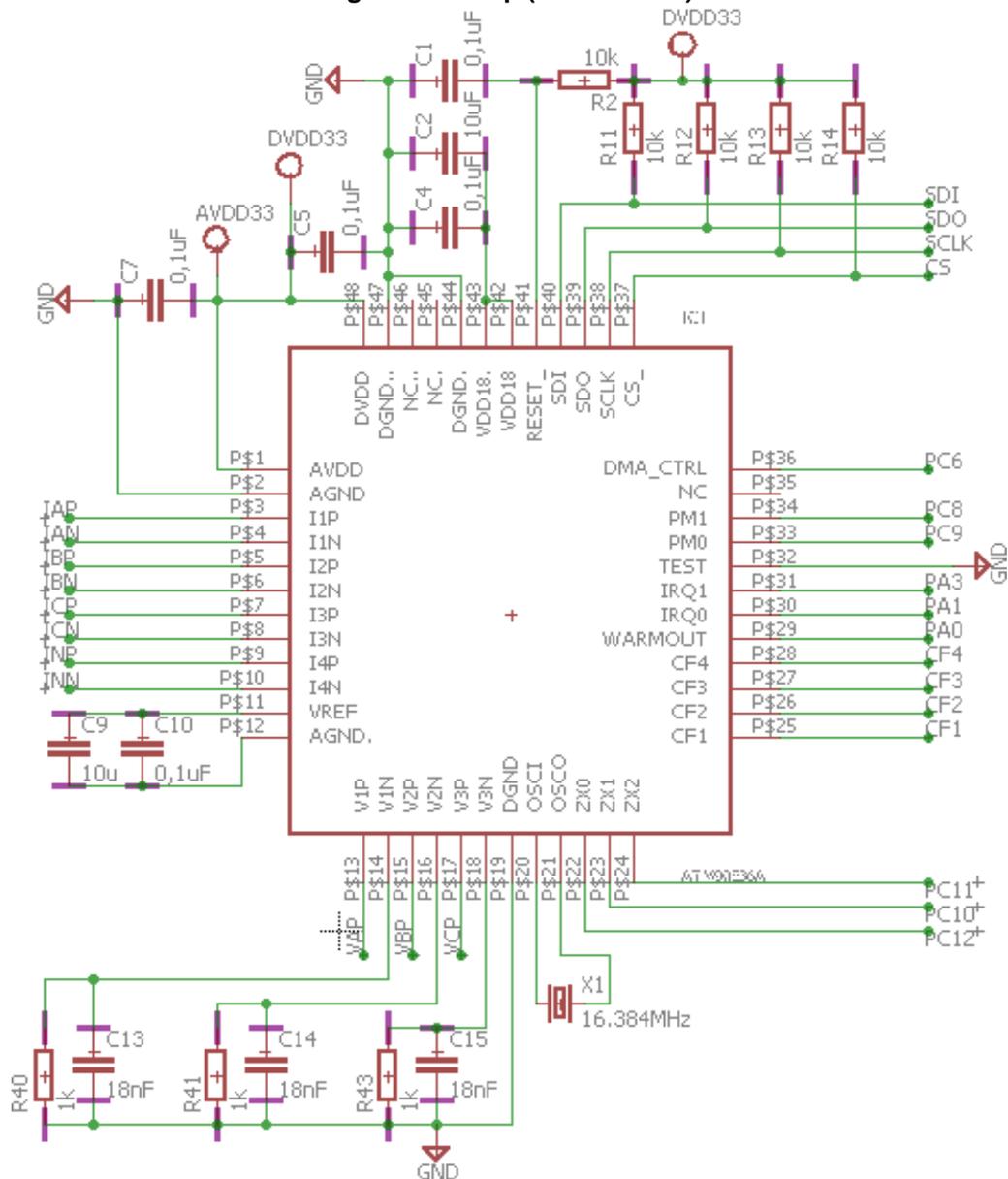
No circuito de amostragem de tensão, apresentado na Figura 9, tem-se que a tensão polifásica é amostrada sobre a rede de divisor resistivo com relação recomendada de $7 \times 240 \text{ k}\Omega : 1 \text{ k}\Omega$. É importante observar que os valores dos resistores e capacitores foram obtidos no Esquema Elétrico Transformador de Corrente, presente no *Application Note* do Circuito Integrado M90E36A, conforme Anexo 1.



Fonte: Autoria própria (2018)

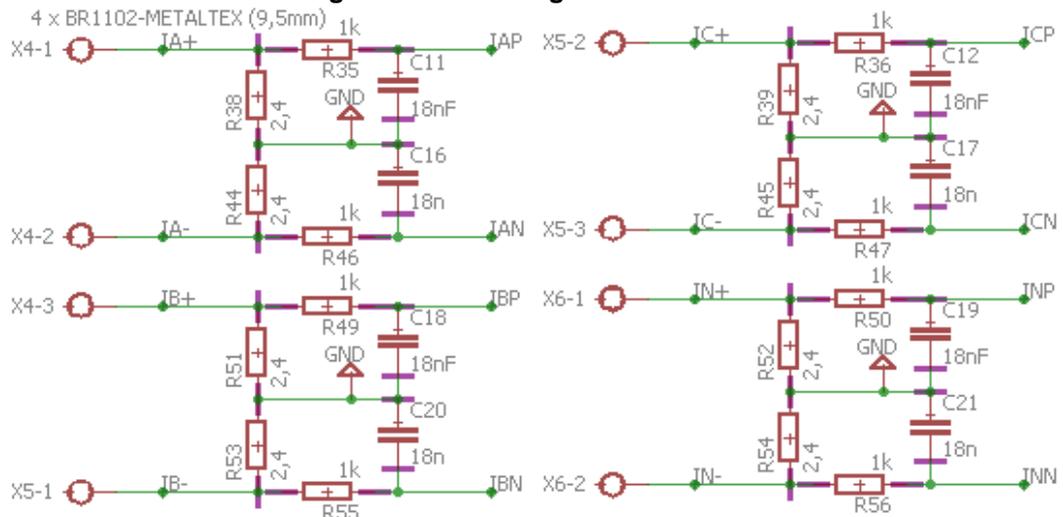
Na Figura 10 é apresentada as conexões diretas aos pinos do circuito integrado M90E36A. Na parte superior do CI ficam concentradas as ligações referentes a parte de tensão de alimentação e terra. A parte inferior é referente a ligação das amostras de tensão. Os pinos da esquerda são em sua maioria as ligações das amostras de corrente e finalmente os pinos da direita são os pinos de conexão com o microcontrolador.

Figura 10: Chip (ATM90E36A)



Fonte: Autoria Própria (2018)

Emprega-se um filtro anti-aliasing para atenuar as altas frequências, maior do que a frequência de Nyquist e evitar que os erros causados pelo aliasing sejam amostrados. A resistência e o capacitor do filtro anti-aliasing utilizados são de 2,4 Ω , 1 k Ω e de 18 nF respectivamente para o circuito de amostra de corrente conforme mostra a Figura 11.

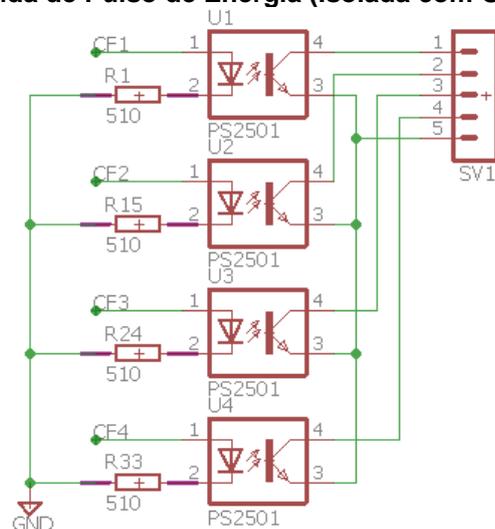
Figura 11: Amostragem de Corrente

Fonte: Autoria própria (2018)

O M90E36A fornece quatro pinos de saída de pulso de energia, podendo ser conectados ao microcontrolador para acumulação de energia, sendo eles:

- CF1: Saída de pulso de energia ativa;
- CF2: Saída de pulso de energia reativa / aparente;
- CF3: Saída de pulso de energia fundamental ativa;
- CF4: Saída de pulso de energia harmônica ativa;

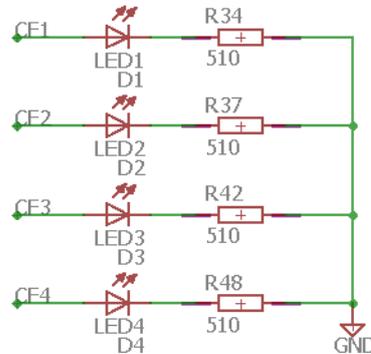
A energia acumulada é convertida em frequência de pulso nos pinos CF e armazenada nos registros de energia correspondentes. Na Figura 12 é mostrado o circuito de proteção utilizando o optoacoplador PS2501 para cada saída de pulso de energia.

Figura 12: Saída de Pulso de Energia (Isolada com Optoacoplador)

Fonte: Autoria própria (2018)

O projeto da PCB também conta com LEDs indicadores nas quatro saídas de pulso de energia, os quais são ligados cada vez que há acúmulo de energia em suas saídas, conforme mostra a Figura 13.

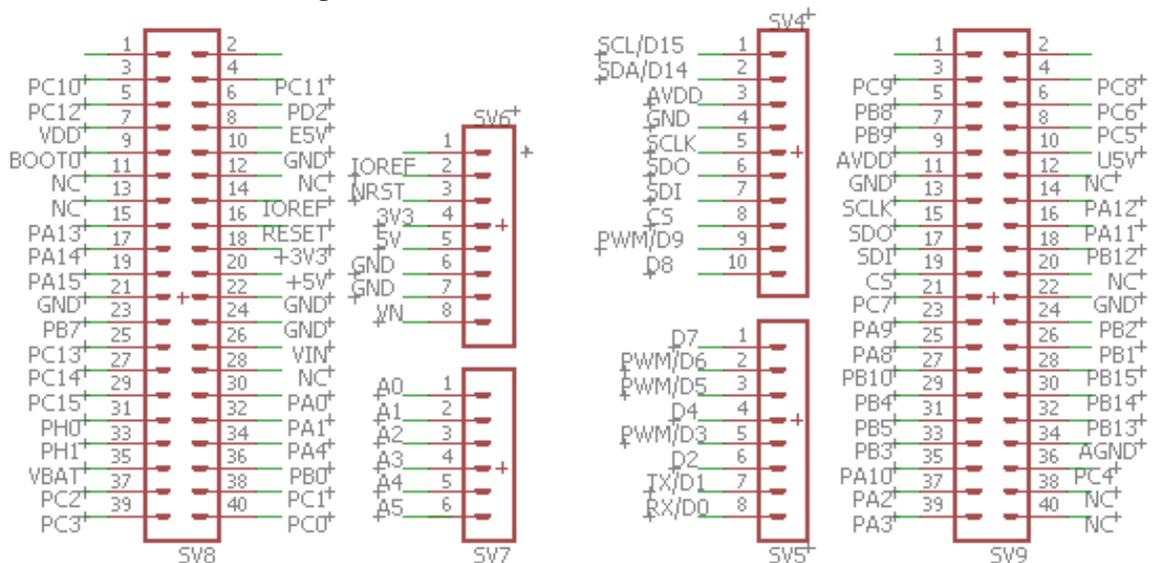
Figura 13: Saída de Pulso de Energia sinalizada por LED



Fonte: Autoria própria (2018)

A Figura 14 apresenta as conexões feitas entre o kit microcontrolador STM32F401RE e o CI M90E36A.

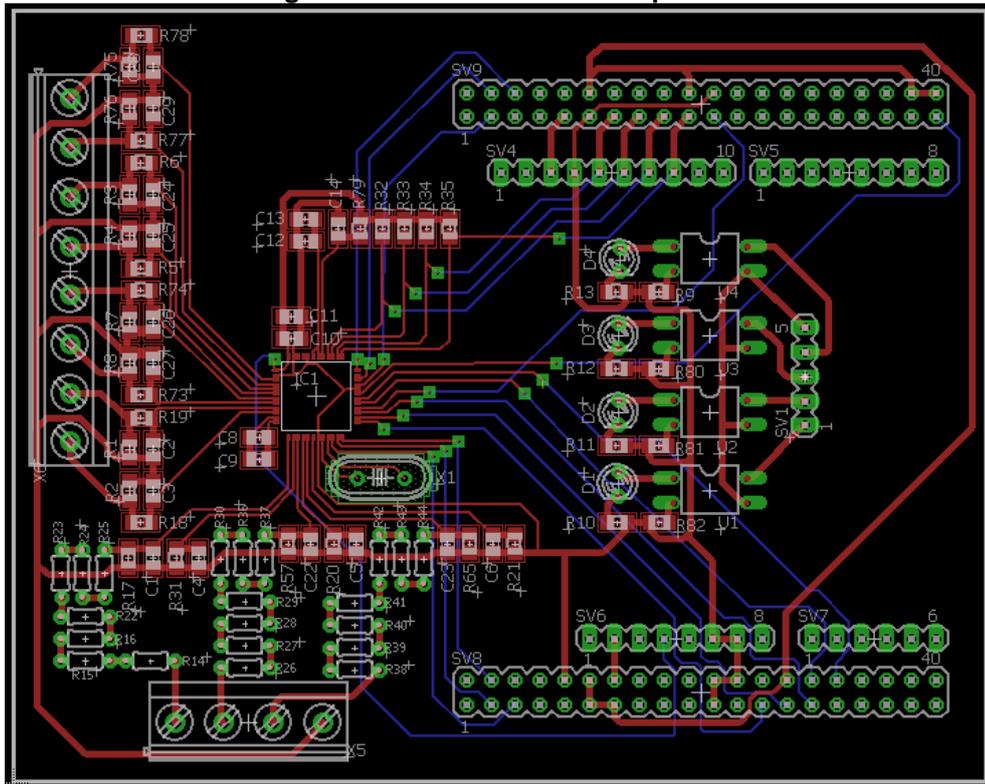
Figura 14: Conexões com o Microcontrolador



Fonte: Autoria própria (2018)

Na Figura 15 é apresentado o projeto da placa de circuito impresso desenvolvida no *software* Eagle. Pode-se ver que foi necessário fazer uma placa dupla face, pelo fato do *software* utilizado limitar para versões grátis o tamanho máximo da placa em 10 x 8 cm e também para que a placa ficasse em um tamanho compatível com o tamanho do kit microcontrolador STM32F401RE para haver o encaixe.

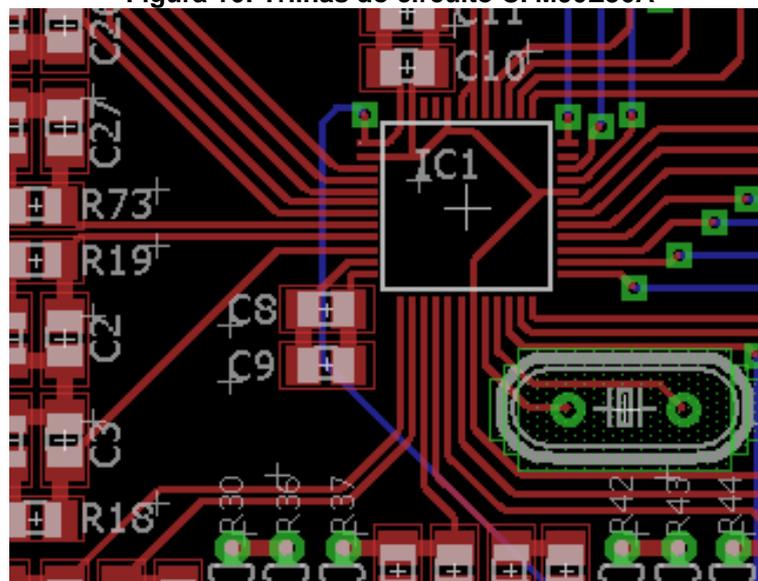
Figura 15: Placa de Circuito Impresso



Fonte: Autoria própria (2018)

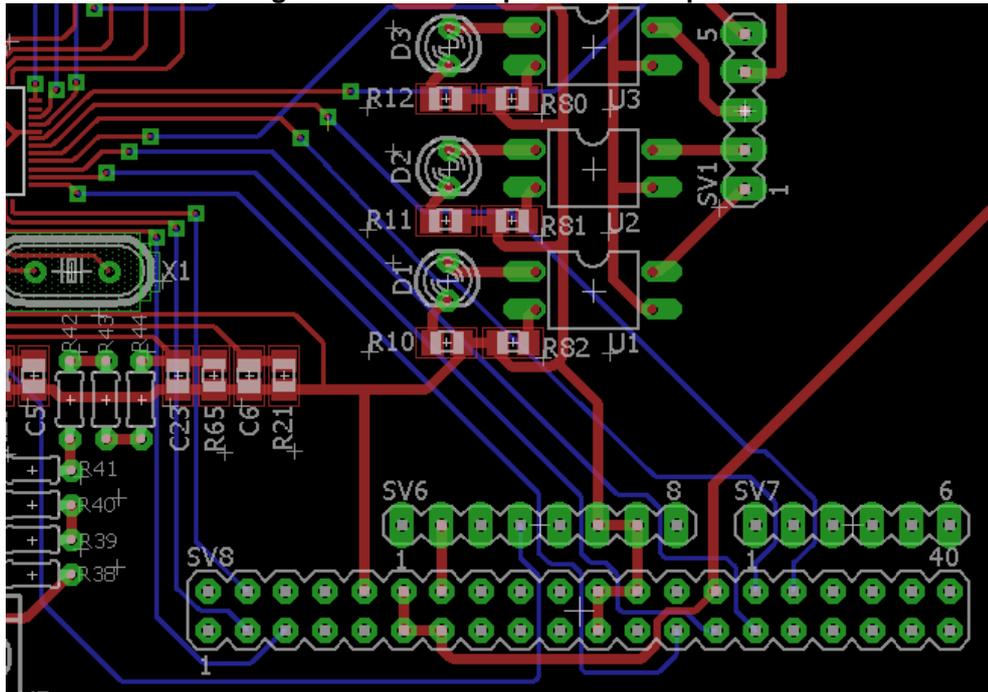
A Figura 16 apresenta em maior escala as trilhas ligadas ao circuito integrado de medição M90E36A. Já a Figura 17 apresenta com melhor visualização as trilhas *top* e *bottom*, além das vias que foram necessárias a criação para se passar de *top* para *bottom* as trilhas de conexão do CI com o microcontrolador.

Figura 16: Trilhas do circuito CI M90E36A



Fonte: Autoria própria (2018)

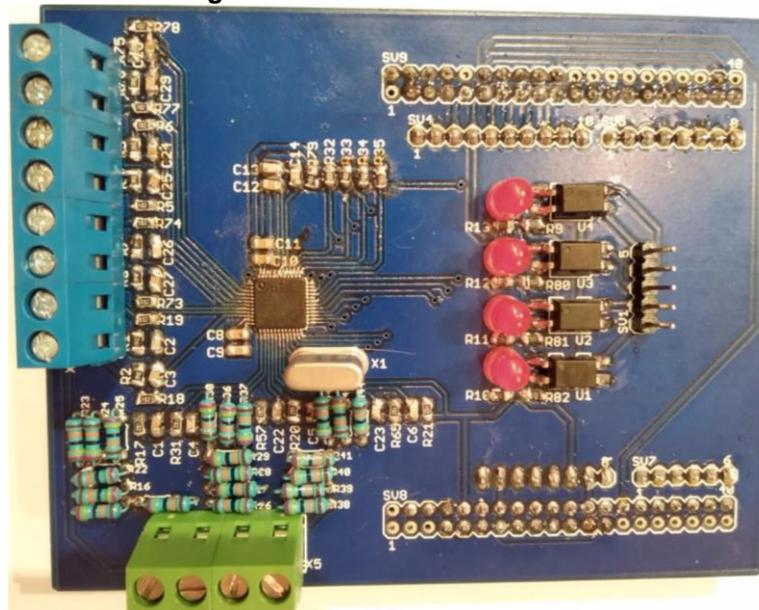
Figura 17: Trilhas top e bottom da placa



Fonte: Autoria própria (2018)

Segue foto da placa de circuito impressa confeccionada na Figura 18.

Figura 18: Foto da PCB montada

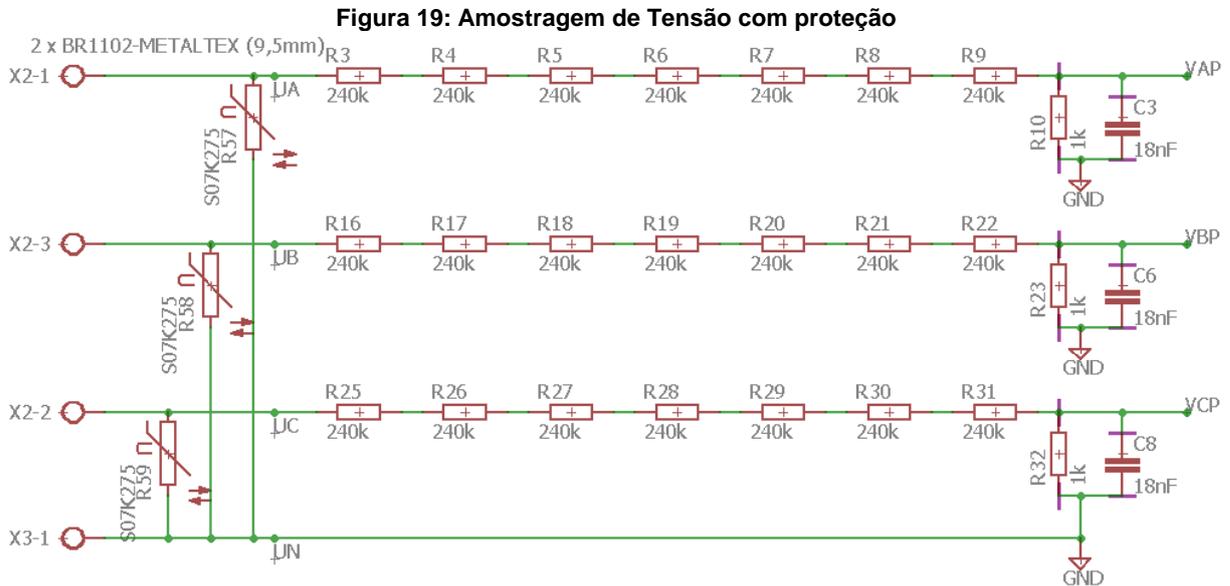


Fonte: Autoria própria (2018)

4.2 SEGUNDA PCI

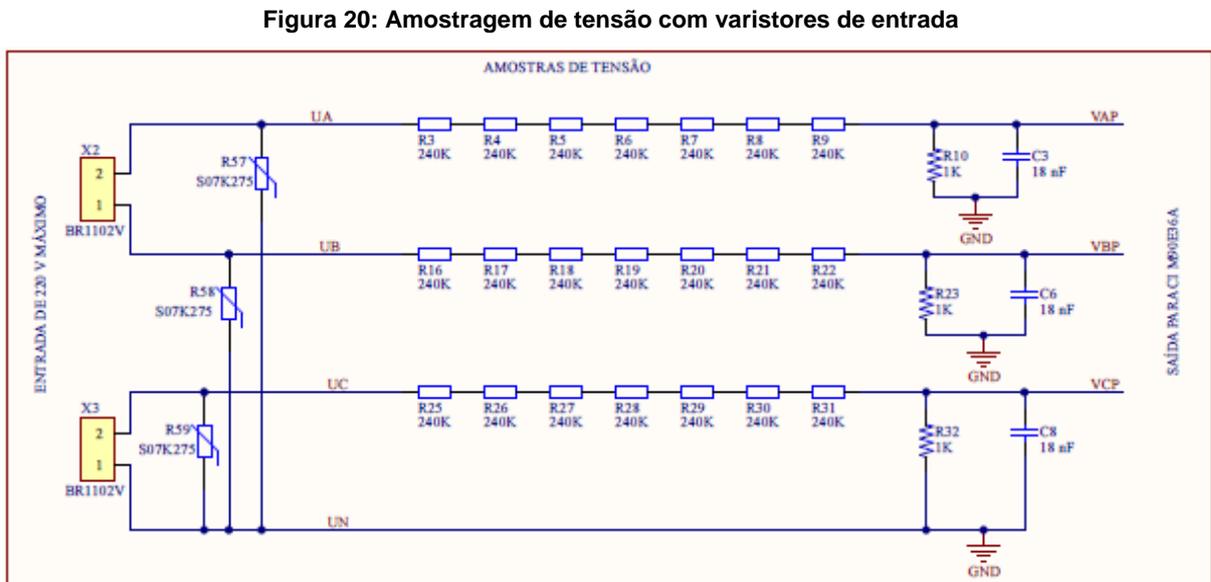
Levando em consideração a utilização do micromedidor em quadros de distribuição decidiu-se pela implementação de um circuito de proteção na entrada das

fases A, B e C utilizando-se de varistores de 275 V. O circuito montado é mostrado na Figura 19.



Fonte: Autoria própria (2018)

Nova placa foi montada no programa Altium. Para tanto, gerou-se nova amostragem de tensão, considerando os varistores na entrada, a qual é apresentada na Figura 20.

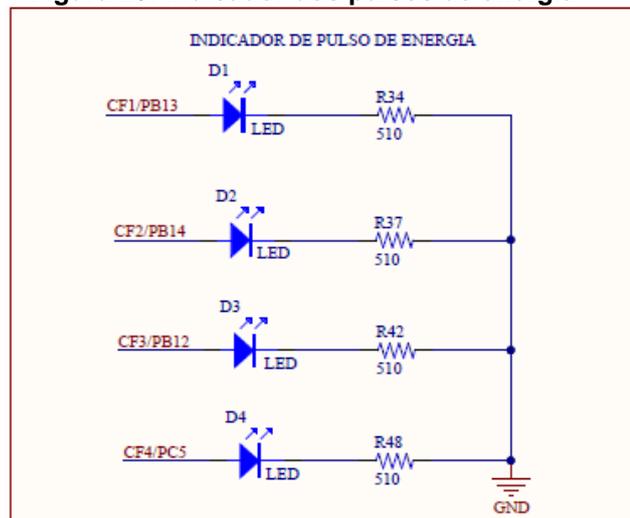


Fonte: Autoria própria (2018)

Além da amostragem de tensão, também se fez a amostragem de corrente, conforme instruções do *Application Note* do CI M90E36A, apresentada na Figura 21.

A Figura 23 mostra os indicadores de pulso de energia, ou seja, os LEDs. O indicadores nas quatro saídas de pulso de energia que são ligados cada vez que há acúmulo de energia.

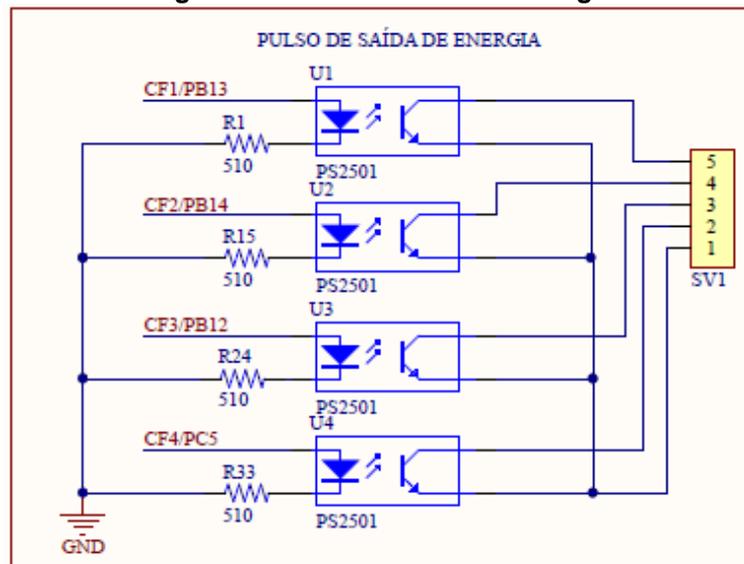
Figura 23: Indicador dos pulsos de energia



Fonte: Autoria própria (2018)

Na Figura 24 a energia acumulada é convertida em frequência de pulso nos pinos e armazenada nos registros de energia correspondentes. O circuito de proteção utiliza o optoacoplador PS2501 para cada saída de pulso de energia.

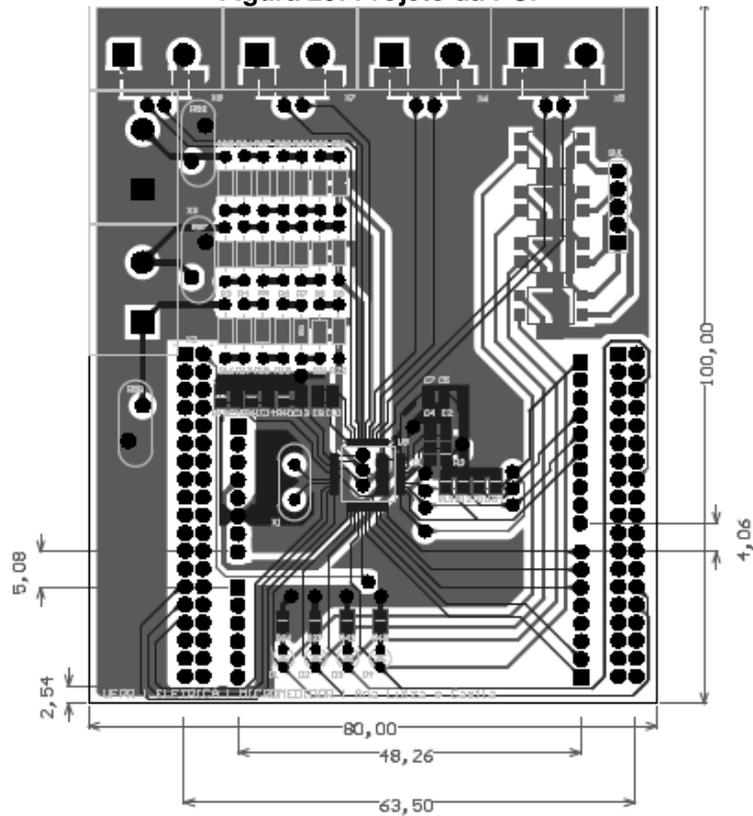
Figura 24: Pulso de saída de energia



Fonte: Autoria própria (2018)

A Figura 25 apresenta o projeto da placa com as dimensões.

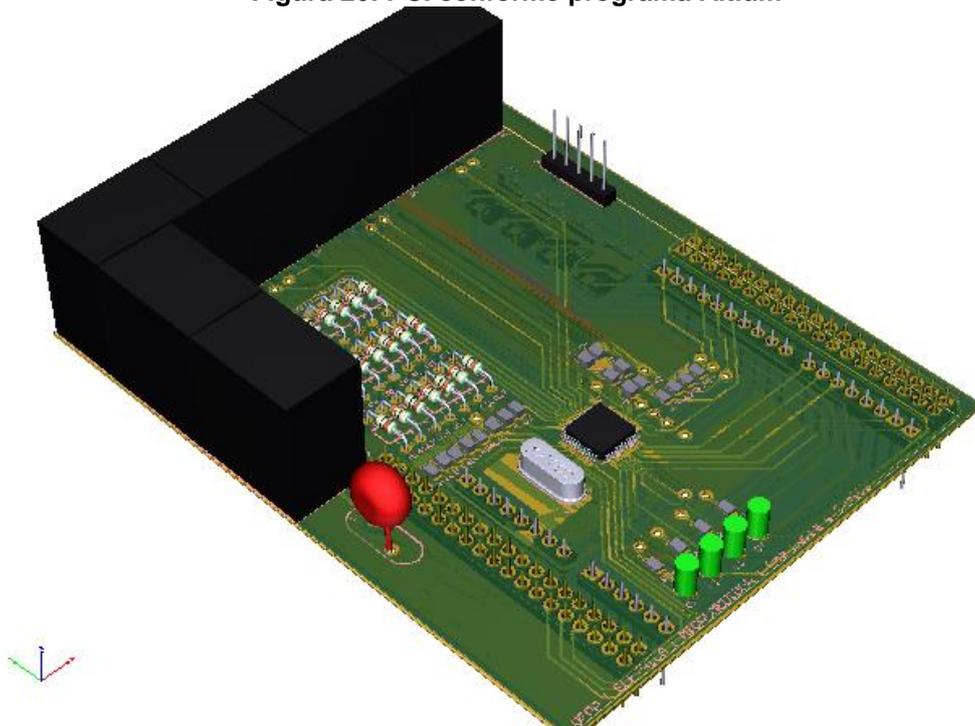
Figura 25: Projeto da PCI



Fonte: Autoria própria (2018)

A Figura 26 apresenta a montagem da placa conforme ilustração do programa Altium.

Figura 26: PCI conforme programa Altium



Fonte: Autoria própria (2018)

5 RESULTADOS

Analisando o datasheet do circuito integrado M90E36A percebe-se que há quatro modos de energia, definido pelos pinos PM1 e PM0, conforme a Tabela 3. O pino PM1 do CI de medição é ligado ao pino PB10 do microcontrolador e o pino PM0 do CI de medição é ligado ao pino PB4 do microcontrolador.

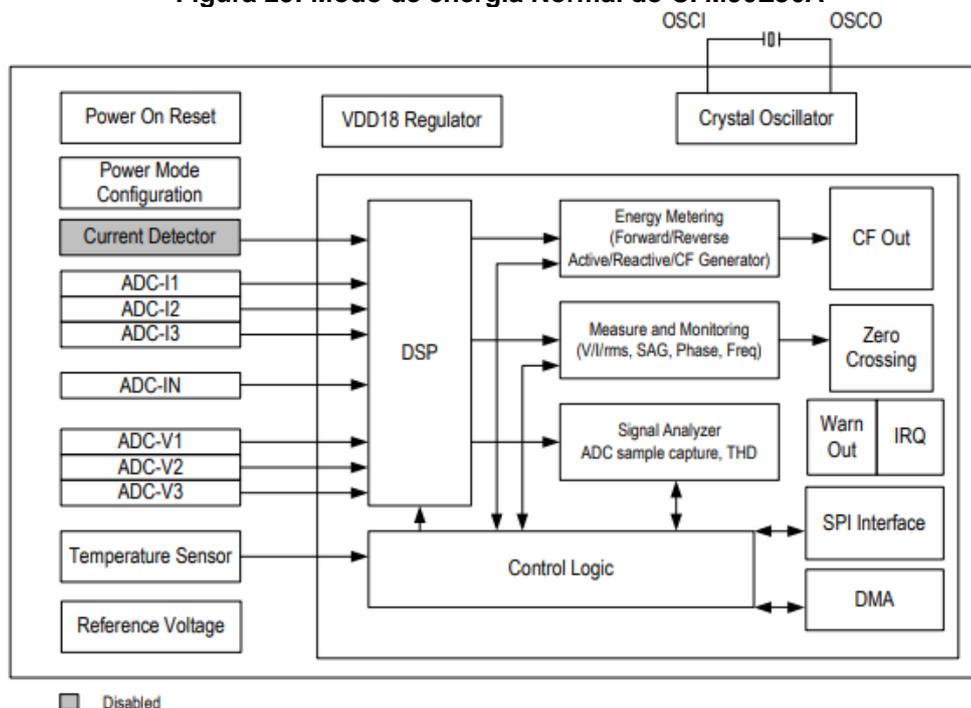
Tabela 3: Descrição dos modos de energia do CI M90E36A

Valores de PM1:PM0	Modo de Energia
11	Normal (Modo N)
10	Medição Parcial (Modo M)
01	Detecção (Modo D)
00	Espera (Modo I)

Fonte: Atmel M90E36A Enhanced Poly-Phase High-Performance Wide-Span Energy Metering IC. Datasheet (2018)

No modo normal, todos os blocos de funções estão ativos, exceto pelo bloco do detector de corrente, conforme é possível ver na Figura 29.

Figura 29: Modo de energia Normal do CI M90E36A

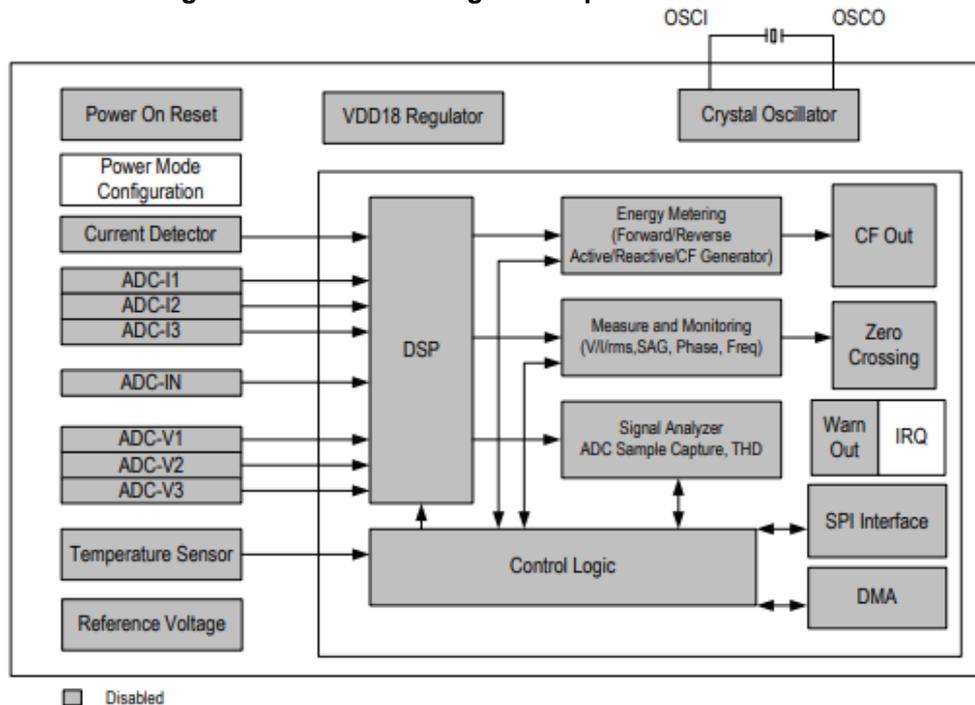


Fonte: Atmel M90E36A Enhanced Poly-Phase High-Performance Wide-Span Energy Metering IC. Datasheet (2018)

No modo de espera, todas as funções são desligadas. A fonte de alimentação dos blocos analógicos é alimentada, mas os circuitos são colocados no modo de desligamento, ou seja, a fonte de alimentação é aplicada, mas todos os caminhos

estão desligados, mesmo que se tenha uma corrente muito baixa. Como a E / S digital não está desligada, o circuito de E / S está ativo no modo inativo como é possível observar na Figura 30.

Figura 30: Modo de energia de Espera do CI M90E36A



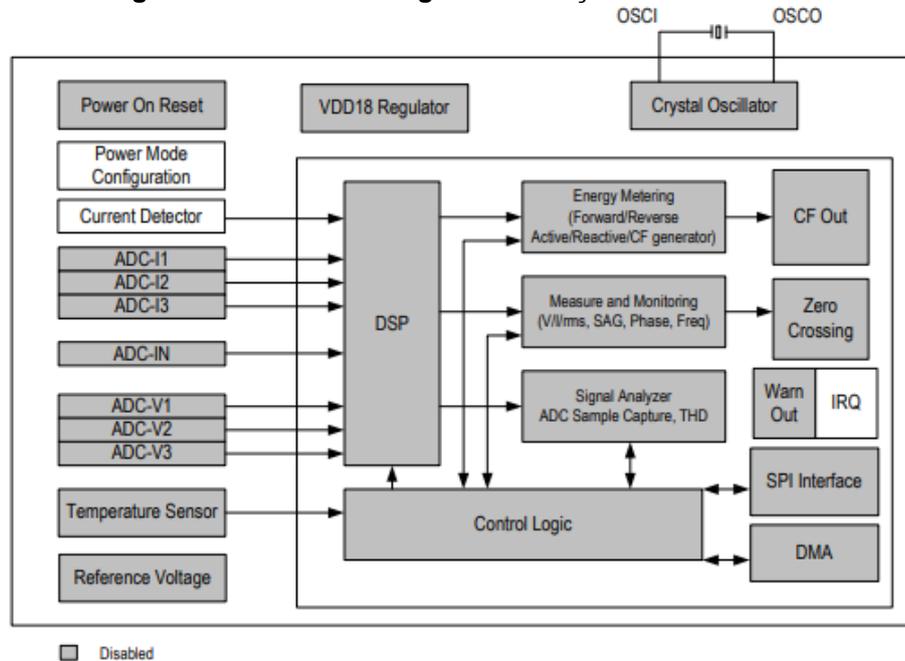
Fonte: Atmel M90E36A Enhanced Poly-Phase High-Performance Wide-Span Energy Metering IC. Datasheet (2018)

Já no modo de detecção, o detector está ativo, conforme apresentado na Figura 31. O detector de corrente compara se qualquer corrente de fase excede limiar configurado através de comparadores de baixa potência. Quando a corrente de uma fase ou de múltiplas fases excede o limite configurado, o circuito integrado M90E36A ativa o pino IRQ0 para alta e mantém até mudar o modo de energia. O estado IRQ0 é apagado ao entrar ou sair do modo de detecção. Quando a corrente de todos os três canais excede o limite configurado, o CI M90E36A ativa o pino IRQ1 para manter-se até mudar o modo de energia. O estado IRQ1 também é apagado ao entrar ou sair do modo de detecção.

O Circuito integrado M90E36A possui dois comparadores para detectar a corrente positiva e negativa de cada fase, sendo que o limite de cada comparador pode ser definido individualmente. Os dois comparadores são ativos por padrão e são chamados de "detecção de dupla face". É possível ativar um comparador apenas para economizar o consumo de energia, o qual é chamado de "detecção do lado único". A detecção do lado duplo tem uma resposta mais rápida e pode detectar a corrente de

"meia onda", porém consome quase o dobro de energia como detecção de lado único. Os comparadores podem ser desligados configurando o registro DetectCtrl.

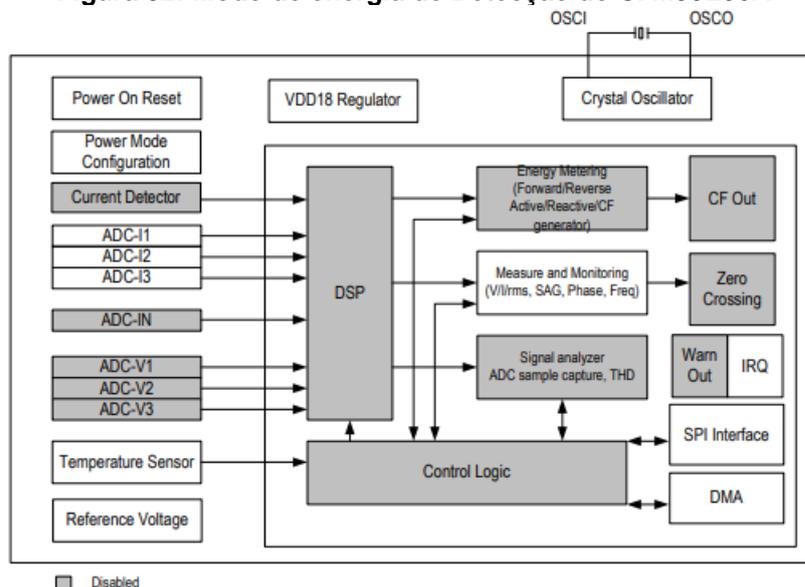
Figura 31: Modo de energia de Detecção do CI M90E36A



Fonte: Atmel M90E36A Enhanced Poly-Phase High-Performance Wide-Span Energy Metering IC. Datasheet (2018)

No modo de medição parcial, os ADCs de tensão, ADC de linha neutra e circuitos digitais estão inativos, conforme a Figura 32. O circuito integrado M90E36A mede o atual RMS de um ciclo de linha. Quando a medição é feita, o M90E36A ativa o pino IRQ0 alto até que o modo Medição Parcial saia. Para isso, é preciso programar os registros relacionados para medição atual do RMS precisa.

Figura 32: Modo de energia de Detecção do CI M90E36A



Fonte: Atmel M90E36A Enhanced Poly-Phase High-Performance Wide-Span Energy Metering IC. Datasheet (2018)

Os modos de energia são controlados pelos pinos PM0 e PM1, sendo que na aplicação são conectados a MCU externo. Geralmente, o circuito integrado M90E36A permanece no modo inativo a maior parte do tempo durante a interrupção. Se a corrente exceder o limite previamente configurado, o circuito integrado informará o MCU. Este, por sua vez, comanda o CI M90E36A para entrar no modo de Medição Parcial por um determinado intervalo para ler a corrente em questão. Em seguida, o CI M90E36A retorna ao modo Inativo. A corrente medida pode ser usada para contar energia de acordo com algum modelo de medição, por exemplo, pode ser empregada no cálculo do RMS atual multiplicado pela tensão nominal para calcular a potência. É interessante observar que qualquer transição do modo de energia passa pelo modo Inativo.

A interface pode funcionar em dois modos: modo Slave (SPI) e modo Master, que também é denominado DMA (Direct Memory Access). O modo de interface é determinado pelo pino DMA_CTRL, conforme Tabela 4:

Tabela 4: Modos de Funcionamento da Interface

MODO	DMA_CTRL	DESCRIÇÃO
Modo Slave (SPI)	0	A interface funciona normalmente como quatro fios Interface SPI.
Modo Master (DMA)	1	A interface funciona como um mestre e despeja dados para os outros dispositivos.

Fonte: Atmel M90E36A Enhanced Poly-Phase High-Performance Wide-Span Energy Metering IC. Datasheet (2018)

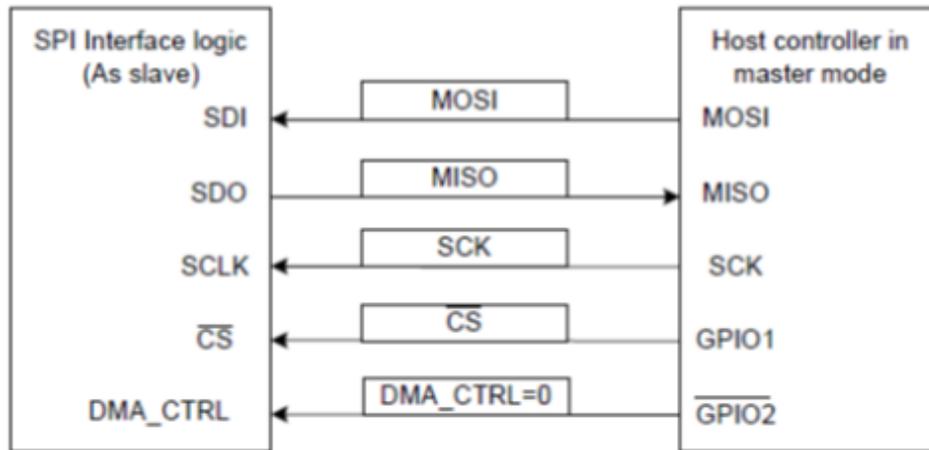
Cinco pinos estão associados à interface, conforme abaixo:

- SDI - pino de dados, bidirecional;
- SDO - pino de dados, bidirecional;
- SCLK - Pino bidirecional. É um pino de saída do relógio no modo mestre e pino de entrada do relógio no modo escravo;
- CS - Pino bidirecional de seleção. É um pino de saída no modo mestre e pino de entrada no modo escravo;
- DMA_CTRL - Pino de entrada unidirecional. O dispositivo externo puxa este pino alto para controlar o trabalho da interface no modo mestre para descarregamento de dados no modo DMA.

Para o presente projeto utilizamos a interface de comunicação no modo Slave (SPI) na qual o microcontrolador STM32F401RE se comportará como mestre (Master) e o CI de medição M90E36A se comportará como escravo (Slave). A interface

funciona no modo escravo quando o pino DMA_CTRL é baixo, conforme mostrado na Figura 33.

Figura 33: Interface de Comunicação – Modo Slave



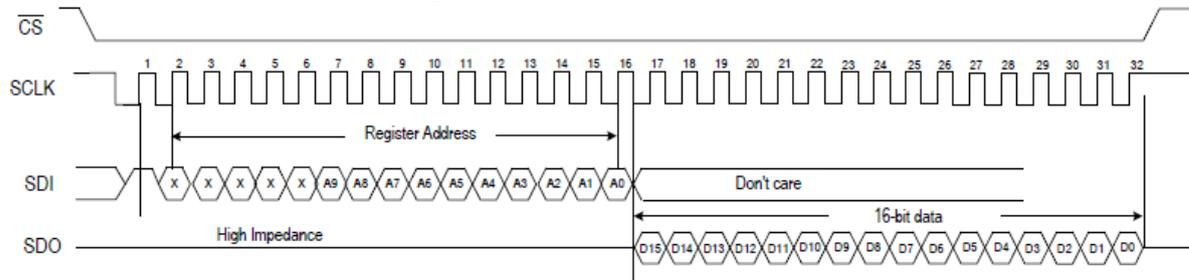
Fonte: Atmel M90E36A Enhanced Poly-Phase High-Performance Wide-Span Energy Metering IC. Datasheet (2018)

A configuração dos pinos de comunicação do CI de medição com o microcontrolador são:

- SDI = MOSI; Pino SDI do CI de medição ligado ao pino PA7 do microcontrolador. O mestre envia dados ao escravo, bit por bit, em série, através da linha MOSI. O escravo recebe os dados enviados do mestre no pino MOSI. Os dados enviados do mestre para o escravo geralmente são enviados primeiro com o bit mais significativo.
- SDO = MISO; Pino SDO do CI de medição ligado ao pino PA6 do microcontrolador. O escravo também pode enviar dados de volta ao mestre através da linha MISO em série. Os dados enviados do escravo de volta ao mestre geralmente são enviados com o bit menos significativo primeiro.
- SCLK = SCK; Pino SCLK do CI de medição ligado ao pino PA5 do microcontrolador.
- CS = LOW; Pino CS do CI de medição ligado ao pino PA9 do microcontrolador. No modo SPI, este pino deve ser conduzido de alto a baixo para cada leitura/gravação e é mantido baixo para toda a operação.
- DMA_CTRL = LOW; Pino DMA_CTRL do CI de medição ligado ao pino PA8 do microcontrolador. No modo escravo o pino DMA_CTRL deve ser mantido baixo.

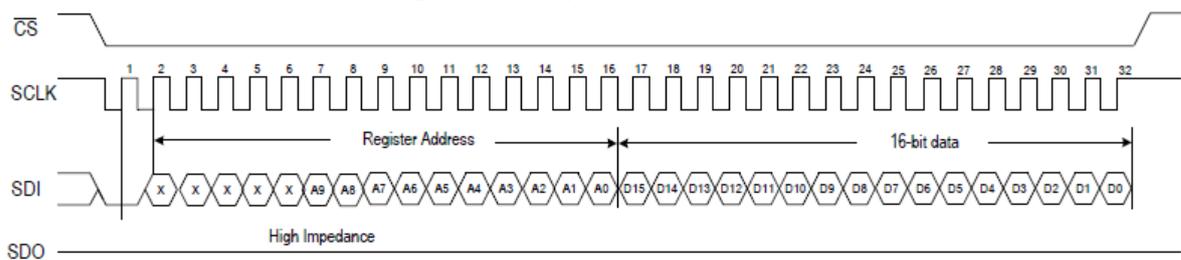
No modo SPI, os dados no SDI são deslocados para o chip na borda ascendente do SCLK, enquanto os dados no SDO são deslocados para fora do chip na borda descendente do SCLK, conforme mostrado na Figura 34 e na Figura 35 .

Figura 34: Sequência de Leitura



Fonte: Atmel M90E36A Enhanced Poly-Phase High-Performance Wide-Span Energy Metering IC. Datasheet (2018)

Figura 35: Sequência de Escrita



Fonte: Atmel M90E36A Enhanced Poly-Phase High-Performance Wide-Span Energy Metering IC. Datasheet (2018)

Quanto ao tipo de acesso, o primeiro bit no SDI define o tipo de acesso conforme a Tabela 5:

Tabela 5 – Tipo de Acesso

Instrução	Descrição	Formato da Instrução
Ler	Ler dos registros	1
Escrever	Escrever nos registros	0

Fonte: Atmel M90E36A Enhanced Poly-Phase High-Performance Wide-Span Energy Metering IC. Datasheet (2018)

Nesse caso, um endereço fixado de 15 bits, seguindo o modelo dos bits do tipo de acesso. O 10-bit inferior é decodificado como endereço e os 5 bits mais altos são "Don't Care".

Para melhor exemplificar, segue parte do código de programação no software Keil na Figura 36, referente a parte de comunicação já descrita.

Figura 36: Parte de código de programação no software Keil descrevendo a comunicação

```

81 void HAL_SPI_MspInit(SPI_HandleTypeDef* hspi)
82 {
83
84     GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct;
85     if(hspi->Instance==SPI1)
86     {
87         /* USER CODE BEGIN SPI1_MspInit 0 */
88
89         /* USER CODE END SPI1_MspInit 0 */
90         /* Peripheral clock enable */
91         __HAL_RCC_SPI1_CLK_ENABLE();
92
93         /**SPI1 GPIO Configuration
94         PA5      -----> SPI1_SCK
95         PA6      -----> SPI1_MISO
96         PA7      -----> SPI1_MOSI
97         */
98         GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_5|GPIO_PIN_6|GPIO_PIN_7;
99         GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_AF_PP;
100        GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
101        GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_VERY_HIGH;
102        GPIO_InitStruct.Alternate = GPIO_AF5_SPI1;
103        HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);
104
105        /* USER CODE BEGIN SPI1_MspInit 1 */
106
107        /* USER CODE END SPI1_MspInit 1 */
108    }
109 }
110 }
111
112 void HAL_SPI_MspDeInit(SPI_HandleTypeDef* hspi)
113 {
114
115     if(hspi->Instance==SPI1)
116     {
117         /* USER CODE BEGIN SPI1_MspDeInit 0 */
118
119         /* USER CODE END SPI1_MspDeInit 0 */
120         /* Peripheral clock disable */
121         __HAL_RCC_SPI1_CLK_DISABLE();
122
123         /**SPI1 GPIO Configuration
124         PA5      -----> SPI1_SCK
125         PA6      -----> SPI1_MISO
126         PA7      -----> SPI1_MOSI
127         */
128         HAL_GPIO_DeInit(GPIOA, GPIO_PIN_5|GPIO_PIN_6|GPIO_PIN_7);
129
130         /* USER CODE BEGIN SPI1_MspDeInit 1 */
131
132         /* USER CODE END SPI1_MspDeInit 1 */
133     }
134 }
135 }
136

```

Fonte: Software Keil (2018)

Para melhorar a confiabilidade a transição entre a leitura e gravação no SPI é definida *CS-low*. Dentro dessa transição tem-se que na escrita o acesso ocorre somente quando o *CS-low* passa de baixo para alto e há exatamente 32 ciclos *SCLK* recebidos durante o período. Já na leitura, se $SCLK \geq 16$ ou seja, se foi recebido o endereço completo, os dados são lidos dos registros internos e chegam ao pino *SDO*; e o *LastSPIData* o registro é atualizado. Os registros só podem ser apagados após a atualização do registro *LastSPIData*.

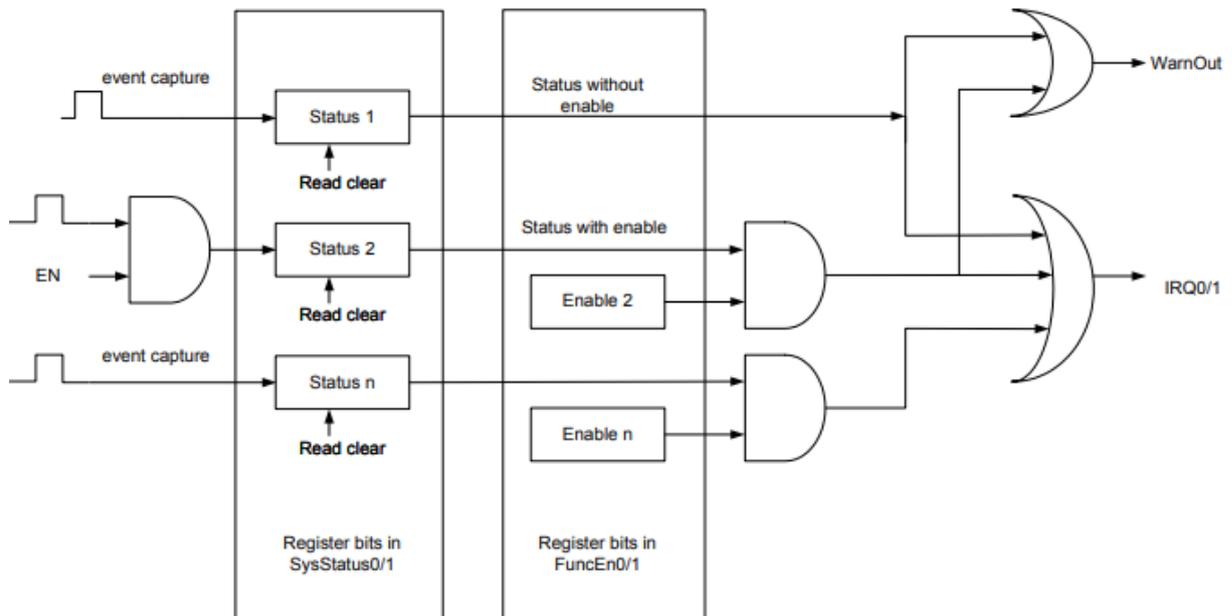
A geração de sinal é atribuída aos registradores *IRQ* e *WARNOUT*. O *IRQ0* é a saída de interrupção 0. Este pino é declarado quando um ou mais eventos no registrador *SysStatus0* (01H) ocorrem. É desabilitado quando não há nenhum bit definido no registrador *SysStatus0* (01H). No modo de detecção, o *IRQ0* é usado para indicar a saída do detector de corrente. O estado *IRQ0* é apagado ao entrar ou sair do modo de detecção. Já o *IRQ1* é a saída de interrupção 1. Este pino é declarado quando um ou mais eventos no registrador *SysStatus1* (02H) ocorrem. É desabilitado quando não há nenhum bit definido no registrador *SysStatus1* (02H). No modo de detecção, o *IRQ1* é usado para indicar a saída do detector de corrente. O estado *IRQ1* é apagado ao entrar ou sair do modo de detecção. *WarnOut* é o aviso de erro fatal. Este pino é declarado alto quando há *checksum* de parâmetro relacionado à medição de erro. Caso contrário, esse pino fica baixo.

Os bits de status no registrador *SysStatus0* geram uma interrupção e obtêm o pino *IRQ0* a ser declarado caso a habilitação correspondente de bits esteja definida no registro *FuncEn0*. Os bits de status no registrador *SysStatus1* geram uma interrupção e obtêm o pino *IRQ1* a ser declarado, se a habilitação correspondente de bits estiver definida no registro *FuncEn1*.

Alguns dos sinais de status também podem fazer valer o pino *WarnOut*. O diagrama da Figura 37 ilustra como os bits de status, os bits habilitados e os pinos *IRQ* / *WarnOut* funcionam juntos.

O *IRQ1* e o *IRQ0* do CI de medição são ligados respectivamente ao pino *PA2* e *PA3* do microcontrolador. Já o pino *WARMOUT* do CI de medição é ligado ao pino *PC11* do microcontrolador.

Figura 37: Geração do sinal IRQ e WarnOut



Fonte: Atmel M90E36A Enhanced Poly-Phase High-Performance Wide-Span Energy Metering IC. Datasheet (2018)

Os pinos CF1, saída de pulso de energia ativa, CF2, saída de pulso de energia reativa/aparente, CF3, saída de pulso de energia fundamental ativa e CF4, saída de pulso de energia harmônica ativa do CI de medição são ligados respectivamente aos pinos PB13, PB14, PB12 e PC5 do microcontrolador.

A energia acumulada é convertida em frequência de pulso nos pinos CF e armazenada nos registros de energia correspondentes. O CI M90E36A fornece registros de acumulação de energia com resolução de 0,1 ou 0,01 CF.

O acúmulo de energia é executado a uma taxa de clock de 1 MHz, em conformidade com o valor de energia calculado pelo processador DSP. Tal processo é equivalente a integrar digitalmente a potência instantânea com um tempo delta de 1 μ s. Essa energia acumulada é usada para calcular os pulsos de CF e os correspondentes registros internos de energia.

O circuito integrado M90E36A possui internamente 7 canais ADC. É possível selecionar quais amostras serão depositadas em qual canal através da configuração dos bits ADC_CH_SEL [15: 9], isto é, (b15 ~ 9, DMACtrl). Cada bit do campo de 7 bits ADC_CH_SEL permite o depósito de dados para um canal ADC, de modo que definindo "1" para um bit tem-se o despejo das amostras correspondentes do canal ADC.

As amostras ADC são enviadas a uma taxa de amostragem de 8K continuamente no modo DMA pelo circuito integrado. As amostras de todos os canais

ADC habilitados são enviadas de maneira intercalada, com a sequência de I4, I1, V1, I2, V2 e I3, V3. Caso algum canal esteja desabilitado, deve ser removido da lista, mantendo o restante da sequência.

Levando-se em conta que os dados obtidos pelo circuito integrado M90E36A serão transferidos para o microcontrolador é importante atentar para sequência de controle para dispositivo externo. Para começar a sequência de despejo de DMA, o dispositivo externo segue as seguintes regras: o dispositivo externo configura o registrador DMA_{Ctrl} e dispositivo externo alterna para o modo escravo SPI. É importante notar que os parâmetros do estado ocioso do relógio / borda de condução, bit de amostra, a largura e a direção do pino de SPI_D0 / SPI_D1 configuradas para CI de medição M90E36A devem corresponder às configurações do dispositivo externo. No passo seguinte o dispositivo externo ativa o sinal DMA_CTRL. O M90E36A troca a direção de E / S, se necessário, depois de detectar que o mestre confirmou o DMA. As amostras são descartadas com um atraso de no máximo 1 período de amostragem, ou seja, 125 us. Na finalização do processo de despejo: o dispositivo externo desativa o sinal DMA_CTRL, de modo que o CI M90E36A interrompe a transação depois que todas as amostras de corrente foram enviadas com sucesso; o dispositivo externo aguarda um período de amostragem de 125 us ou detecta que o sinal CS é puxado para interface de volta ao modo mestre.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O protótipo do micromedidor proposto tem como princípio básico tornar-se uma ferramenta que auxilie ao consumidor, permitindo a visualização e monitoramento de dados elétricos.

Conforme sugestão dada pelo professor orientador, optou-se pelo emprego de um circuito integrado de medição de energia. A opção que atendeu aos critérios técnicos e a necessidade de tempo foi o CI M90E36A, da Microchip. Isso acabou por descartar outros circuitos integrados de medição pesquisados. Já o microcontrolador escolhido foi STM32F401RE Núcleo 64, pois já se tinha disponível.

Para desenvolver o projeto da placa de circuito impresso no Eagle, uma das dificuldades encontradas foi a necessidade de desenhar o CI M90E36A, pois não se encontrou o componente na biblioteca do software.

Referente a montagem dos componentes na placa de circuito impresso foi necessária a compra dos componentes em sua maioria pela internet e até mesmo utilizar componentes com package diferentes do especificado, pela falta no mercado brasileiro.

Considerando-se a necessidade de uma proteção na entrada do circuito, nova placa foi projetada agora utilizando-se o software Altium. O interessante é que nesse software foi mais fácil desenhar a parte de encaixe das duas placas se comparado ao software Eagle.

A parte de programação do CI de medição foi a mais demorada e que mais nos travou até pela falta de contato com o microcontrolador e pouco material na Internet.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, C. K. S., Matthew N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. Porto Alegre: Bookman, 2003.

ALMEIDA, A. L. **Desenvolvimento de um sistema sem fios e microcontrolado de medição inteligente de energia elétrica para cargas residenciais**. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

CHEUNG, K.; WANG, X.; CHIU, B.; XIAO, Y.; RIOS-ZALAPA, R. Generation Dispatch in a Smart Grid Environment. **IEEE - Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)**, 2010.

CUSTÓDIO, E. S. **Desenvolvimento de um Micro medidor Inteligente para Gerenciamento pelo lado da Demanda em Redes Elétricas Inteligentes**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2013.

EGGEA, R. F. **Gerenciamento de energia incluindo painel fotovoltaico e armazenamento de energia para redes elétricas inteligentes via aplicativo de celular**. Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, Curitiba, 2014.

GUEDES, J. D. S. **Método de monitoramento não invasivo de cargas elétricas residenciais**. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

MCIELECTRONICS. Split core current transformer. Disponível em: <https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/Datasheet_SCT013.pdf> Acesso em 30 de ago 2018.

MICROCHIP. **Application Note. Poly-Phase Energy Metering IC. M90E36A**. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Atmel-46104-SE-M90E36A-%20ApplicationNote%20.pdf>> Acesso em: 25 de ago 2018.

MICROCHIP. **Atmel M90E36A Enhanced Poly-Phase High-Performance Wide-Span Energy Metering IC DATASHEET**. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-46004-SE-M90E36A-Datasheet.pdf>> Acesso em: 18 ago 2018.

MOKRYANI, G.; MEMBER, S.; PICCOLO, A.; SIANO, P. **An Overview on the SmartGrid Concept**. , p. 3322–3327, 2010.

MORAES, P. M. Sistema de medição de energia baseado no medidor de energia Teridian 71M6515H. Universidade da Madeira: fev 2013. Disponível em: <<https://digituma.uma.pt/bitstream/10400.13/552/1/MestradoPriscillaMoraes.pdf>> Acesso em 11 ago 2018.

Split-Core Current Transformer. Model: SCT-013 Series. Disponível em: <<https://nicegear.nz/obj/pdf/SCT-013-datasheet.pdf>> Acesso em 19 ago 2018.

ST. NUCLEO-XXXXRX NUCLEO-XXXXRX-P STM32 Nucleo-64 boards. Disponível em:<https://www.st.com/resource/en/data_brief/nucleo-f401re.pdf> Acesso em 19 ago 2018.

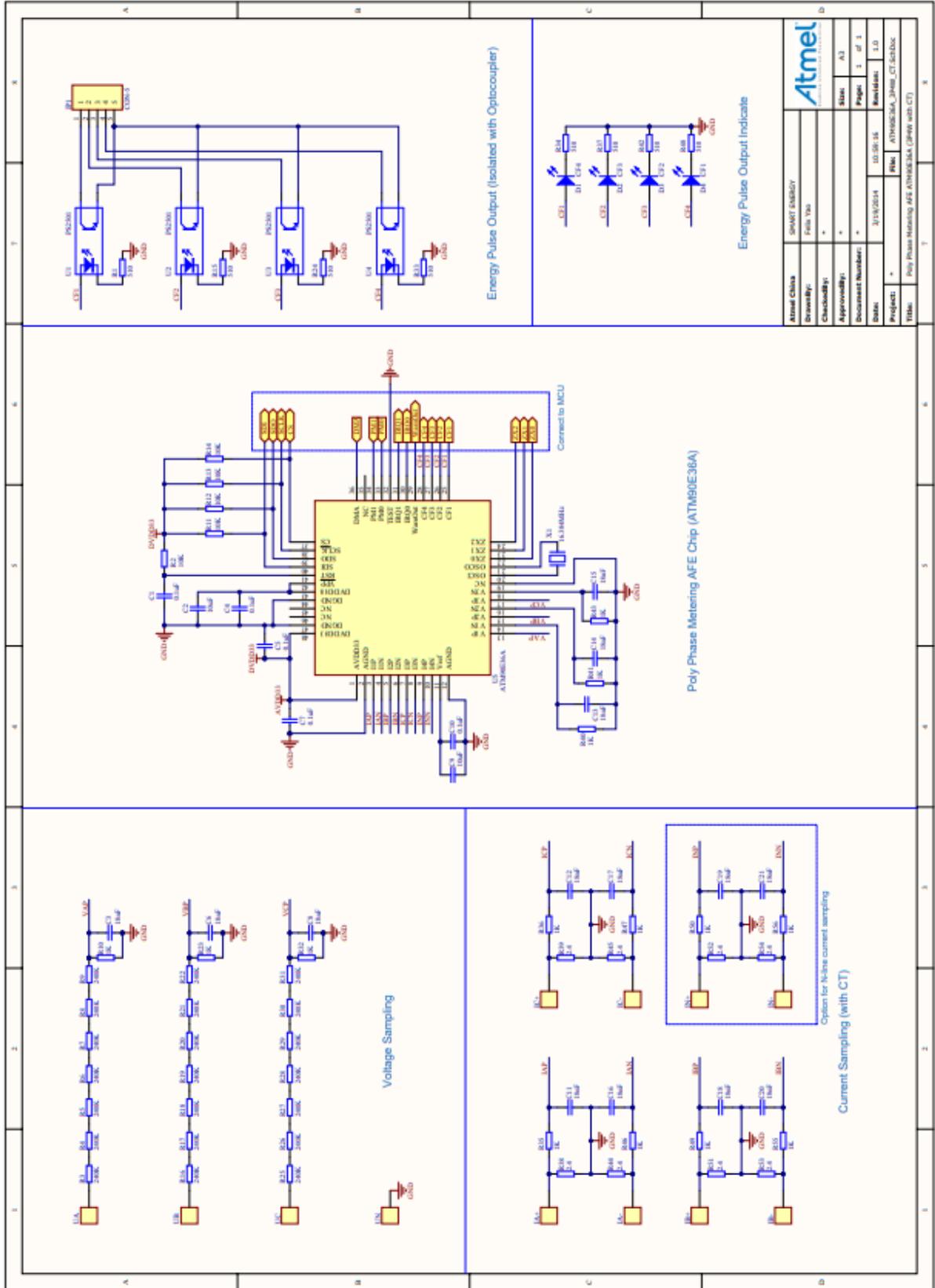
ST. TN1235 Technical note Overview of the ST-LINK embedded in STM32 MCU Nucleo, Discovery Kits and Eval Boards. Disponível em:<https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/technical_note/group0/30/c8/1d/0f/15/62/46/ef/DM00290229/files/DM00290229.pdf/jcr:content/translations/en.DM00290229.pdf> Acesso em 19 ago 2018.

ST. UM1724 User manual STM32 Nucleo-64 boards. Disponível em:<https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/98/2e/fa/4b/e0/82/43/b7/DM00105823.pdf/files/DM00105823.pdf/jcr:content/translations/en.DM00105823.pdf> Acesso em 19 ago 2018.

TEIXEIRA, L. L. **Medidor de Energia Eletrônico.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009.

TROWLER, D.; WHITAKER, B. **Bi-Directional Inverter and Energy Storage System.** University of Arkansas. Disponível em:<<https://www.ti.com/corp/docs/landing/universityprogram/arkansas.pdf>> Acesso em 20 ago 2016.

ANEXO 1 – ESQUEMA ELÉTRICA TRANSFORMADOR DE CORRENTE



ANEXO 2 – DATASHEET DO SENSOR DE CORRENTE SCT – 013

Split-Core Current Transformer



Model: SCT-013 Series

Characteristics: Opening size: 13mm×13mm

Non-linearity ±3% (10%—120% rated input current)

1.5m leading wire. Diagram for standard three-output

Current output type or Voltage output type

(Voltage output type built-in sampling resistor)

Purpose: Suitable for the current measuring

monitoring and protection of AC motor

lighting equipment air compressor and so on

Core material: Ferrite

Mechanical strength: The number of switching is not less than 1000 times

(Test under 20°C).

Safety index: Dielectric strength 6000V AC/1min

Fire resistance property: in accordance with UL94-V0

Working temperature: -25°C—+70°C

Outline size diagram: (in mm)

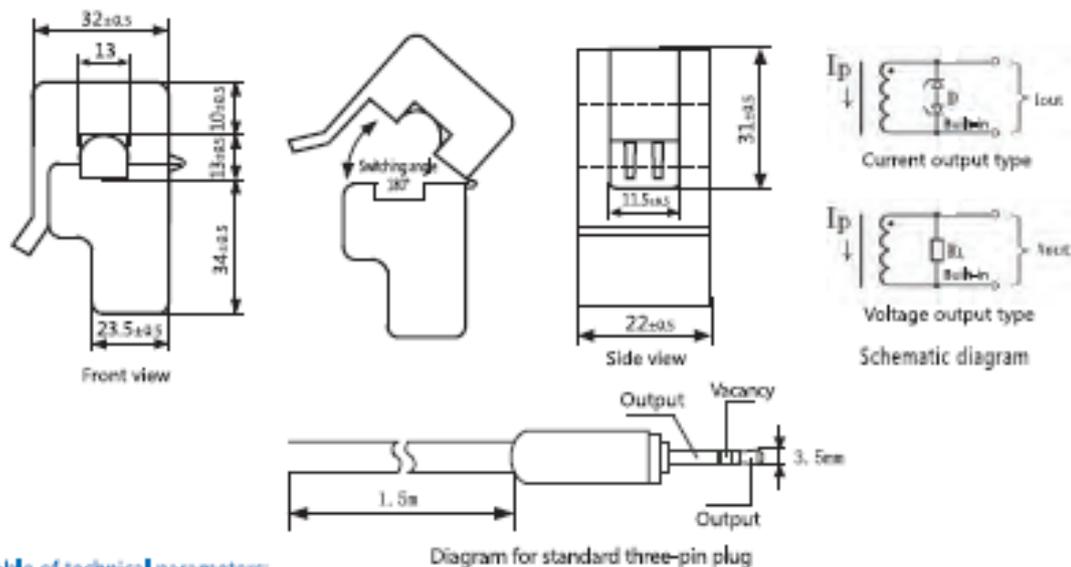


Table of technical parameters:

Model	SCT-013-000	SCT-013-005	SCT-013-010	SCT-013-015	SCT-013-020
Input current	0-100A	0-5A	0-10A	0-15A	0-20A
Output mode	Current/33mA	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V
Model	SCT-013-025	SCT-013-030	SCT-013-050	SCT-013-060	SCT-013-070
Input current	0-25A	0-30A	0-50A	0-60A	
Output mode	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V	

Output mode: Voltage output type built-in sampling resistor; Current output type built-in protective diode;
Forbidden to be opening operating for current type.

